

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



## **Estudo do Galgamento no Troço de Costa Cascais – Carcavelos**

Andreia Margarida Marques Ferreira

**Mestrado em Ciências do Mar**

Dissertação orientada por:  
Professor Doutor César Andrade, FCUL  
Doutora Engenheira Maria Teresa Reis, LNEC



UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



## **Estudo do Galgamento no Troço de Costa Cascais – Carcavelos**

Andreia Margarida Marques Ferreira

**Mestrado em Ciências do Mar**

Dissertação orientada por:  
Professor Doutor César Andrade, FCUL  
Doutora Engenheira Maria Teresa Reis, LNEC

*Ao Eng.º Moreno Ferreira*



## AGRADECIMENTOS

É com enorme prazer que dedico estas palavras às pessoas que, de forma direta ou indireta, me apoiaram durante este percurso académico, transformando-o numa experiência tão enriquecedora.

Em primeiro lugar, gostaria de prestar os meus agradecimentos aos meus orientadores, que tanto me apoiaram, ao Professor Doutor César Andrade, por quem nutro uma grande admiração e que, apesar dos seus muitos afazeres, aceitou a orientação desta dissertação tornando assim possível a realização deste trabalho, e à minha coorientadora, Eng.<sup>a</sup> Maria Teresa Reis, que me acolheu de braços abertos desde o primeiro momento.

Ao Professor Doutor Rui Taborda, pelo voto de confiança, e por ter permitido que eu pudesse continuar a explorar este tema e ir mais além. À Eng.<sup>a</sup> Juana Fortes, pela disponibilidade em me receber, sempre, e dar aquele abanão quando eu precisei.

Às instituições que apoiam os projetos de investigação, incentivando a partilha de conhecimento, tanto através da cedência de informação como através de mecanismos de colaboração e parcerias, em particular à FCUL, ao LNEC e ao Instituto Dom Luiz – FCUL. E diretamente na realização desta dissertação, à Câmara Municipal de Cascais e aos SMPC, na pessoa de Nuno Silva, e à Capitania de Cascais, pelo Capitão do Porto de Cascais, Capitão-de-fragata Mário António Fonte Domingues, agradeço a disponibilidade e a cedência de informação.

Aos professores e colegas desta que foi a minha casa, ao Prof. Doutor Mário Cachão e à Prof.<sup>a</sup> Doutora Conceição Freitas pela orientação em fases chave de tomada de decisão; à Ana Silva, à Ana Bastos, a quem eu muito agradeço a preocupação e a amizade, à Mafalda Carapuço, que me ajudou a desencadear todo este processo, à Soraia Romão, com quem tive o prazer de partilhar o mesmo espaço, muito obrigada pela paciência e amizade, ao restante pessoal do departamento de Geologia que tão bem me acolheu. Ao Prof. Doutor Carlos Antunes. Ao Luís Dias pela oportunidade, valorização e compreensão, ao Bruno Aparício pelo apoio. Aos colegas, de áreas e *backgrounds* tão diversos, com quem eu tive o prazer de privar durante este curso, que tornaram este percurso muito gratificante, em especial à Soraia Teixeira e à Helena Guerreiro com quem partilhei alegrias e frustrações, sempre acompanhadas de umas boas gargalhadas. Ao meu colega e amigo do Instituto Hidrográfico, Capitão-Tenente Teotónio Barroqueiro, e ao Paul Mota, sempre disponíveis para ajudar.

Ao meu mentor e amigo, Eng.<sup>o</sup> Moreno Ferreira, que foi o grande impulsionador para que eu continuasse os meus estudos, que me desafiou para problemas sobre os quais nunca me tinha debruçado, e que tanto me vieram a cativar, muito lhe agradeço, por me mostrar como se pode, e deve, abordar os assuntos de vários ângulos e sem preconceitos na procura da solução, por me dar o exemplo de que se pode ser feliz quando se faz o que se gosta, e tanto mais haveria a agradecer.

Um obrigada do tamanho do mundo aos meus amigos desta e de muitas guerras, que resistem apesar da minha falta de tempo, aos amigos mais recentes e aos que já não estão tão perto, que no entanto estão sempre presentes, com especial atenção à família Bruna, Sérgio e pequena M<sup>a</sup> Inês, ao Gonçalo, ao Enzo e à Rocío, à Ritinha, à Fernanda, ao Paulo, à Raquel, à Joana, à Rita, à Lucía, que tanto cozinhou para mim enquanto eu estudava, e à minha mais recente colega de casa Vanda.

E à minha querida família, e quão privilegiada eu sou por fazer parte dela, que têm uma paciência e compreensão imensurável para comigo e me dão todo o apoio e muito amor, à minha mãe, a quem tudo devo, que sozinha enfrentou um mar de dificuldades para nos criar, à minha maninha, que foi a primeira pessoa a acreditar e dar valor às minhas capacidades, ao meu irmão, ao meu cunhado Tiago Pereira, e ao benjamim da família, o meu querido sobrinho Santiago, que ainda tão pequenino e já fez tanto!

## RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo realizado no âmbito do Mestrado em Ciências do Mar, o qual se debruçou sobre o fenómeno do galgamento costeiro, tendo como objetivo a análise de viabilidade da utilização dos métodos consagrados na literatura na avaliação dos fenómenos de galgamento costeiro no troço litoral Cascais - Carcavelos. Neste sentido, foram modelados sete anos de agitação marítima (2009 a 2015) e calculados os respetivos caudais médios galgados para oito perfis ao longo da costa em análise.

O troço costeiro foi caracterizado em quatro perfis-tipo, devido à diversidade geomorfológica e artificialização deste litoral. Para cada perfil-tipo foram escolhidos dois métodos de cálculo, para comparação, e os resultados foram confrontados com registos históricos, de modo a avaliar o modelo que melhor descreva o fenómeno de galgamento em cada um dos contextos geomorfológicos selecionados.

Neste estudo, utilizaram-se modelos que combinam condições de forçamento oceanográfico perto da rebentação com a morfologia da superfície afetada pelo espraio das ondas para quantificar a intensidade do galgamento costeiro em litorais “endurecidos” (rochosos ou protegidos por defesas aderentes). O estudo incide especialmente sobre o desempenho de dois métodos empíricos e uma ferramenta neuronal: o modelo proposto por Mase *et al.* (2013), que tem por base o conceito de perfil equivalente (recorrendo a um “perfil imaginário”) e as formulações empíricas descritas no manual EurOtop (2016), nos capítulos 5 e 6 daquele manual; e outro, mais complexo e inclusivo, que utiliza redes neuronais artificiais, através do programa NN\_OVERTOPPING 2, desenvolvido pelo Delft Hydraulics (Coeveld *et al.*, 2005).

Os forçamentos impostos advêm de uma série de dados *hindcast* de agitação marítima em águas profundas (Bertin *et al.*, 2013), propagados para a costa através do modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), e o nível do mar registado pelo marégrafo de Cascais (DGTerritório, 2018). Quanto à caracterização das estruturas costeiras e do perfil de praias de areia, onde estas existem marginando o sopé das estruturas, foi feito o levantamento *in situ* da geometria das mesmas, através de trabalhos de campo. Estes resultados foram combinados com informação topobatimétrica disponível, nomeadamente, o MDT LiDAR 2011 (DGTerritório, 2011).

Fez-se um levantamento de dados documentais da ocorrência de eventos de galgamentos no troço de costa em análise, o que resultou numa compilação de nove registos entre 2009 e 2015, passados em notícias reportadas nos meios de comunicação social e numa análise de registos compilados por entidades públicas, como o Serviço Municipal de Proteção Civil de Cascais. A juntar à listagem acima descrita, durante a realização desta dissertação, foi possível acompanhar, *in loco*, um evento de galgamento no litoral em estudo, resultante da passagem da tempestade Dóris, no dia 02.02.2017, durante as marés vivas. Neste evento foram registados os efeitos da passagem desta tempestade, a qual foi utilizada para validação e para comparação com outra tempestade que se encontra documentada, a tempestade Hércules/Christine (Pinto *et al.*, 2014).

Dos resultados obtidos, admite-se que as metodologias estudadas possam estar a sobrestimar os eventos de galgamento e não produzem uma clara distinção quantitativa dos eventos face aos impactos observados através de registos documentais.

Seria essencial a validação quantitativa, e uma posterior calibração dos modelos empíricos, assim como o estudo da aplicação de modelos numéricos para uma avaliação eficaz do fenómeno.

Palavras-chave: Galgamento costeiro, Espraio das ondas, Riscos costeiros, Agitação marítima, Cascais

## ABSTRACT

This dissertation presents a study carried out within the scope of the Master degree in Sea Science, focused on the phenomenon of wave overtopping, which aims to analyse the feasibility of using the methods established in the literature in the evaluation of wave overtopping phenomena over the coastline Cascais – Carcavelos. In this sense, seven years of sea state data (2009 to 2015) were modelled and their respective mean overtopping discharges calculated for eight profiles along the coast under analysis.

Due to the coastline's geomorphological diversity and artificialization the coastal section was characterized in four standard profiles. Two methods were applied, and their results were confronted with historical records in order to evaluate which model best describes the phenomenon for each selected geomorphological context. In this study, models that combine oceanographic conditions near the surf zone with the profile geomorphology affected by wave run-up were used in order to quantify wave overtopping in hard coastlines (rocky or protected by coastal defences). The study focuses especially on the performance of two empirical methods and an artificial neural network tool. Mase *et al.* (2013) model, which is based on the concept of an equivalent slope (using an "imaginary slope") and the empirical formulations described in the EurOtop (2016), on chapters 5 and 6 of that manual; and another one, more complex and inclusive, which uses artificial neural networks, through the program NN\_OVERTOPPING 2, developed by the Delft Hydraulics (Coeveld *et al.*, 2005).

The wave conditions imposed in this study were hindcast data series in deep water (Bertin *et al.*, 2013), propagated to the surf zone by the SWAN model (Simulating WAVes Nearshore), and the sea level records from Cascais tide gauge (DGTerritório, 2018). Coastal structures and sandy beaches (when occurs) were characterized based on in-situ survey. The survey results were combined with available topobathymetric information, namely the MDT LiDAR 2011 (DGTerritório, 2011).

An inventory of documentary data on the occurrence of overtopping events in the stretch of coast under analysis was carried out, which resulted in a compilation of nine records between 2009 and 2015, reported in the media and by Cascais' Municipal Services of Civil Protection. In addition, during the course of this dissertation, it was possible to witness an in-situ overtopping event resulting from the passage of the storm Dóris, in 02.02.2017, during high spring tide. The coastal impact of this storm was used for qualitative analysis and comparison with another documented storm, the storm Hércules / Christine (Pinto *et al.*, 2014).

The analysis of the results suggests that studied methodologies may be overestimating the events, and that they do not produce a clear quantitative distinction of the events in viewer the documented impacts.

Quantitative validation, and subsequent calibration of empirical models, as well as numerical modelling, would be essential for a reliable evaluation of the overtopping phenomenon.

Key words: Wave overtopping, Wave run-up, Coastal risks, Wave conditions, Cascais

## ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract .....	iv
Anexos.....	vi
Índice de Imagens.....	vi
Índice de Tabelas.....	ix
Símbolos.....	x
Acrónimos .....	xi
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos e Abordagem Metodológica.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação.....	3
2. Enquadramento Teórico .....	4
2.1. Estruturas Costeiras.....	4
2.2. Galgamento Costeiro.....	5
2.2.1. Forçamentos Oceanográficos .....	7
2.2.2. Enquadramento Geral dos Modelos de Cálculo do Galgamento.....	15
2.2.3. Modelos.....	15
2.2.4. Modelos de Cálculo do Galgamento Utilizados .....	21
2.2. Avaliação do Risco de Galgamento e Inundação .....	27
3. Caso de Estudo: Troço Litoral Cascais - Carcavelos .....	30
3.1. Enquadramento Geográfico.....	30
3.2. Enquadramento Socioeconómico .....	32
3.3. Enquadramento Geológico e Geomorfológico .....	33
3.4. Registos Documentais de Eventos de Galgamento .....	35
3.5. Estruturas Costeiras Analisadas .....	35
3.6. Forçamento Oceanográfico .....	42
3.6.1. Variações do Nível do Mar.....	42
3.6.2. Agitação Marítima.....	43
3.7. Modelos de Cálculo Aplicados.....	54
3.8. Resultados e Discussão .....	54
3.9. Validação.....	62
3.9.1. Tempestade Dóris.....	62
3.9.2. Tempestade Dóris vs Tempestade Hércules/Christine .....	66
4. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....	68
Referências Bibliográficas .....	70

## ANEXOS

Anexo A – Compilação das Ocorrências

Anexo B – Peças Desenhadas

Anexo C – Marés: Valores Médios e Extremos

## ÍNDICE DE IMAGENS

Figura 2.1. Nomenclatura adotada do zonamento da praia ( <a href="http://www.aprh.pt/rgci/glossario/prai.html">http://www.aprh.pt/rgci/glossario/prai.html</a> ) .....	4
Figura 2.2. Diferentes tipos de paredões e diques. (Pilarezyk, 1990, em CEM, 2002) .....	5
Figura 2.3. Esquema de galgamento, 'green water' .....	5
Figura 2.4. Tipos de galgamento conforme coroamento da estrutura costeira (EurOtop, 2016) .....	6
Figura 2.5. Parâmetros que condicionam o galgamento .....	6
Figura 2.6. Tipos de onda e respetivos níveis de energia relativa (Ronald, 2011) .....	7
Figura 2.7. Efeitos da profundidade do fundo sobre o movimento orbital e perfis das ondas de vento (Segar & Segar, 2012) .....	8
Figura 2.8. Representação esquemática do fenómeno de refração (Carmo, 2016) .....	9
Figura 2.9. Representação esquemática do fenómeno de difração (Carmo, 2016) .....	9
Figura 2.10. Representação esquemática do fenómeno de reflexão (Carmo, 2016) .....	10
Figura 2.11. Representação dos vários tipos de rebentação (Segar & Segar, 2012) .....	11
Figura 2.13. Cenários de subida do nível médio do mar para o período 2006-2100 (relativo a 1986–2005) (IPCC, 2014) .....	14
Figura 2.13. Variação do nível médio do mar registado no marégrafo de Cascais (Antunes, 2016) ....	14
Figura 2.14. Exemplo do perfil de um dique (EurOtop, 2007) .....	17
Figura 2.15. Configuração de uma rede neuronal para aplicação em estudos de galgamento costeiro (EurOtop, 2007) .....	17
Figura 2.16. Esquema geral dos possíveis perfis em redes neuronais (EurOtop, 2016) .....	18
Figura 2.17. Esquema de decisão (adaptado e traduzido de EurOtop, 2016) .....	22
Figura 2.18. Parâmetros utilizados no modelo NN_Overtopping 2 (Coeveld <i>et al.</i> , 2005) .....	24
Figura 2.19. Perfil imaginário segundo Mase <i>et al.</i> (2013) .....	24
Figura 2.20. Diagrama adimensional de profundidade de rebentação versus a declividade da onda ao largo (Mase <i>et al.</i> , 2013) .....	24
Figura 2.21. Esquema do programa Calcula_Runup_Galgamento_Mase.f .....	26
Figura 2.22. Sistema de eixos (adaptado de Mase <i>et al.</i> , 2013) .....	26
Figura 2.23. Esquema da formulação do risco .....	27
Figura 3.1. Registo fotográfico dos danos causados pelo temporal de 3 a 7 de janeiro de 2014. Praia do Tamariz (Pinto <i>et al.</i> , 2014) .....	30

Figura 3.2. Enquadramento geográfico do concelho de Cascais ( <a href="https://pt.wikipedia.org/wiki/Cascais">https://pt.wikipedia.org/wiki/Cascais</a> ) .....	30
Figura 3.3. Distribuição geográfica das praias no troço em análise (Toponímia utilizada em Playoceano ©, 2018).....	31
Figura 3.4. Distribuição da ocupação e uso do solo (CLC, 2012).....	32
Figura 3.5. Empresas sedeadas em Cascais por setor em 2012. Última atualização: 2014-03-13 (INE) .....	32
Figura 3.6. À esquerda, banhistas na praia da Ribeira, em Cascais, 1864-84. À direita, rei D. Carlos I junto à praia da Ribeira (Henriques <i>et al.</i> , 2014) .....	32
Figura 3.7. População residente total por freguesia. Censos de 1970 a 2011. Edifícios por freguesia. Censos de 1981 a 2011 (INE).....	33
Figura 3.8. Geologia (simplificada) do concelho de Cascais (Taborda <i>et al.</i> , 2010) .....	33
Figura 3.9. Fotografia de terreno obtida em 31.07.2017 e vista de satélite do litoral de arriba na zona do Forte de Santo António da Barra.....	34
Figura 3.10. Distribuição dos perfis-tipo no troço costeiro Cascais-Carcavelos.....	36
Figura 3.11. Localização dos perfis estudados .....	36
Figura 3.12. Passeio Marítimo - Monte Estoril .....	37
Figura 3.13. Perfil A.ME - Monte Estoril .....	37
Figura 3.14. Praia do Tamariz .....	38
Figura 3.15. Perfil B.TM.....	38
Figura 3.16. Praia da Poça.....	39
Figura 3.17. Perfil B.PC .....	39
Figura 3.18. Praia de São Pedro do Estoril.....	39
Figura 3.19. Perfil B.SP.....	40
Figura 3.20. Praia dos Gémeos - Carcavelos.....	40
Figura 3.21. Perfil B.GC .....	40
Figura 3.22. Praia do Moinho - Carcavelos.....	40
Figura 3.23. Perfil B.MC.....	41
Figura 3.24. Praia da Poça, zona do Forte da Cadaveira .....	41
Figura 3.25. Perfil C.FC .....	41
Figura 3.26. Arriba junto ao Forte Santo António da Barra .....	42
Figura 3.27. Perfil D.FB.....	42
Figura 3.28. Série de dados de agitação marítima entre 2009 e 2015 .....	43
Figura 3.29. Variação mensal de $H_{m0}$ , ao largo, entre 2009 e 2015 (diagrama de extremos e quartis, com a representação da média, mediana e valores atípicos) .....	44
Figura 3.30. Variação mensal de $T_p$ , ao largo, entre 2009 e 2015 (diagrama de extremos e quartis, com a representação da média, mediana e valores atípicos) .....	44

Figura 3.31. Agitação marítima ao largo: altura significativa, rumo e período de pico. Distribuição global e por estações entre 2009 e 2015 .....	45
Figura 3.32. Localização dos pontos de caracterização da agitação marítima junto à costa .....	46
Figura 3.33. Sistema de malhas encaixadas utilizado .....	47
Figura 3.34. Variação estatística mensal de $H_{m0}$ no Subtroço I, entre 2009 e 2015 (diagrama de extremos e quartis, com a representação da média, mediana e valores atípicos).....	48
Figura 3.35. Agitação marítima no ponto 1: altura significativa, rumo e período de pico. Distribuição global e por estações, entre 2009 e 2015 .....	49
Figura 3.36. Variação estatística mensal de $H_{m0}$ no Subtroço II, entre 2009 e 2015 (diagrama de extremos e quartis, com a representação da média, mediana e valores atípicos).....	50
Figura 3.37. Agitação marítima no ponto 2: altura significativa, rumo e período de pico. Distribuição global e por estações entre 2009 e 2015 .....	51
Figura 3.38. Variação estatística mensal de $H_{m0}$ no Subtroço III, entre 2009 e 2015 (diagrama de extremos e quartis, com a representação da média, mediana e valores atípicos) .....	52
Figura 3.39. Agitação marítima no ponto 3: altura significativa, e período de pico. Distribuição global e por estações, entre 2009 e 2015.....	53
Figura 3.40. Geometria adotada para o perfil-tipo A .....	55
Figura 3.41. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PA.ME1 .....	56
Figura 3.42. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PA.ME2 .....	56
Figura 3.43. Geometria adotada para os perfis-tipo B.....	57
Figura 3.44. Geometria adotada para o perfil-tipo C.....	58
Figura 3.45. Geometria adotada para o perfil-tipo D .....	59
Figura 3.46. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PB.TM .....	60
Figura 3.47. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PB.PC .....	60
Figura 3.48. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PB.SP.....	60
Figura 3.49. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PB.GC.....	61
Figura 3.50. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PB.MC .....	61
Figura 3.51. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PC.FC .....	61
Figura 3.52. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PD.FB .....	61
Figura 3.53. Nível do mar no dia 02.02.2017, registado no marégrafo de Cascais (DGTerritório, 2018) .....	62
Figura 3.54. Altura significativa no dia 02.02.2017, registada na boia oceânica da Nazaré (IH, 2018).....	62
Figura 3.55. Variação dos caudais médios galgados nos vários perfis analisados entre as 12:00 h e as 21:00 h do dia 02.02.2017, devido à passagem da tempestade Dóris, pelo EurOtop (2016) .....	63
Figura 3.56. Locais monitorizados durante a tempestade Dóris, (I) Monte Estoril, (II) Praia da Poça, (III) Praia da Azarujinha, (IV) Forte da Barra, (V) Praia São Pedro do Estoril e (VI) Praia da Parede .....	63
Figura 3.57. Monte Estoril. Galgamento do passeio marítimo, com marcação das áreas atingidas pelas ondas no dia 02.02.2017 às 17:00 h .....	64

Figura 3.58. Monte Estoril. Galgamento do passeio marítimo no dia 02.02.2017 às 17:00 h .....	64
Figura 3.59. Praia da Poça. Galgamento do passeio marítimo com marcação das áreas atingidas pelas ondas no dia 02.02.2017 às 17:20 h .....	65
Figura 3.60. Forte da Cadaveira. Galgamento do passeio marítimo no dia 02.02.2017 às 17:30 h .....	65
Figura 3.61. Forte da Barra no dia 02.02.2017 às 18:00 h .....	66
Figura 3.62. Praia de São Pedro do Estoril no dia 02.02.2017 às 18:10 h .....	66
Figura 3.63. Distribuição longitudinal (de oeste para leste) dos caudais médios galgados nas tempestades Dóris e Hércules/Christine, por perfil. ....	67

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Modelos de propagação de agitação marítima (adaptado de Carmo, 2016) .....	12
Tabela 2.2. Quadro resumo - Modelos empíricos de processos de galgamento .....	16
Tabela 2.3. Quadro resumo - Modelos numéricos .....	18
Tabela 2.4. Níveis de proteção por tipo de projeto (EurOtop, 2007) .....	27
Tabela 2.5. Valores críticos de galgamento (traduzido e adaptado de CEM (2002), capítulo VI) .....	28
Tabela 2.6. Valores críticos de galgamento (traduzido de EurOtop, 2016) .....	29
Tabela 3.1. Quadro resumo - Ocorrência de eventos de galgamento costeiro no troço em estudo entre 2009 e 2017. ....	35
Tabela 3.2. Tabela de médias e valores extremos da altura da maré astronómica com subida do NMM (m ZH) em Cascais (2001 – 2017) .....	42
Tabela 3.3. Caracterização estatística da agitação ao largo, entre 2009 e 2015. ....	43
Tabela 3.4. Descrição dos pontos alvo ou de chegada (sistema de coordenadas ETRS_1989_Portugal_TM06) .....	46
Tabela 3.5. Caracterização estatística da agitação do subtroço I, entre 2009 e 2015 .....	48
Tabela 3.6. Caracterização estatística da agitação do subtroço II, entre 2009 e 2015 .....	50
Tabela 3.7. Caracterização estatística da agitação do subtroço III, entre 2009 e 2015. ....	52
Tabela 3.8. Descrição dos perfis e método utilizado .....	54
Tabela 3.9. Input Perfil-tipo A para os modelos de NN_Overtopping 2 e do EurOtop (2016) .....	55
Tabela 3.10. Input Perfis-tipo B para o modelo de Mase <i>et al.</i> (2013) .....	57
Tabela 3.11. Input Perfis-tipo B para o modelo do EurOtop (2016) .....	58
Tabela 3.12. Input Perfis-tipo C para o modelo de Mase <i>et al.</i> (2013) e EurOtop (2016) .....	58
Tabela 3.13. Input Perfis-tipo D para o modelo de Mase <i>et al.</i> (2013) e EurOtop (2016) .....	59



## SÍMBOLOS

$a, b, c$	Coefficientes empíricos; o símbolo $c$ também poderá significar celeridade da onda ( $\text{m.s}^{-1}$ ) (ver símbolo $c$ )	—
$A_c$	Bordo livre do manto resistente da estrutura (parte permeável)	m
$B$	Largura da berma do talude da estrutura	m
$B_t$	Largura do pé da estrutura	m
$c$	Velocidade de fase ou celeridade da onda; ou coeficiente empírico adimensional (ver símbolos $a, b$ e $c$ )	$\text{m.s}^{-1}$
$c_1, c_2, c_3$	Coefficientes empíricos	—
$d, d_b$	Profundidade do fundo, distância entre a superfície livre do mar e o fundo; na zona de rebentação, $b$	m
$Dir, Dir_m, Dir_p$	Rumo da onda em relação ao Norte; médio, $m$ ; e de pico, $p$	° N
$Fr, Fr_m, Fr_n$	Número de Froude; no modelo, $m$ ; e à escala natural, $n$	—
$g$	Aceleração da gravidade ( $\approx 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ )	$\text{m.s}^{-2}$
$G_c$	Largura da berma de coroamento da estrutura	m
$h, h_b$	Altura de água em frente à estrutura; altura de água sobre a berma do talude da estrutura, $b$	m
$H, H_o, H_b, H_x$	Altura da onda; em águas profundas, $o$ ; na rebentação, $b$ ; e no ponto $x$ do domínio de propagação, $x$ .	m
$H_s, H_{m0}$	Altura significativa das ondas, $s$ , e altura significativa estimada por análise espectral através momento de ordem zero, $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$	m
$h_t$	Altura de água sobre o pé do talude da estrutura	m
$K_d, K_r, K_s, K_t$	Coefficientes de difração, $d$ ; refração, $r$ ; empolamento, $s$ ; e transmissão, $t$	—
$l$	comprimento	m
$L, L_o$	Comprimento de onda, e em águas profundas, $o$	m
$m_n$	Momento de ordem $n$ do espectro	$\text{m}^2.\text{s}^{-n}$
$N, N_{Fg}, N_{Fi}, N_{Fs}$	Fator de escala entre o modelo e o caso de estudo, para a força gravítica, $Fg$ ;	—
$N_{F\mu}$	para força de inércia, $Fi$ ; para a tensão de superfície, $Fs$ ; e para o atrito viscoso, $F\mu$	—
$N_{ow}$	Número de ondas incidentes que galgam a estrutura	—
$N_w$	Número de ondas incidentes	—
$P, P_v$	Probabilidade de excedência; e probabilidade de excedência do volume de galgamento por onda	—
$q, q_{m\acute{a}x}, q_{n\%}$	Caudal médio galgado, por unidade de desenvolvimento do coroamento; máximo, $m\acute{a}x$ ; e quantil de ordem $n\%$ do caudal médio galgado	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-1}$
$Q_{n\%}$	Quantil de ordem $n\%$	—
$R$	Coefficiente de reflexão	—
$R^*$	Bordo livre do coroamento da estrutura (parte impermeável) adimensional	—
$R_c$	Bordo livre do coroamento da estrutura (parte impermeável)	m
$Re, Re_m, Re_n$	Número de Reynolds; no modelo, $m$ ; e à escala natural, $n$	—
$R_u, R_{u,2\%}, R_{u,1/n}, R_{u,m\acute{a}x}$	$Run-up$ da onda, altura na vertical entre o nível do mar em repouso e a cota máxima atingida pelo espraio da onda; $run-up$ excedido por 2% das ondas incidentes; a média da parte $1/n$ mais elevada dos valores de $run-up$ , $1/n$ ; $run-up$ máximo, $m\acute{a}x$ ; e $run-up$ máximo não excedido em $n\%$ dos casos para um registo de 100 ondas, $n\%,100$	m
$(R_{u,m\acute{a}x})_{n\%,100}$		
$t$	Tempo	s

$T, T_m, T_{m-1,0}, T_p$	Período; período médio, $m$ ; período espectral definido por $m_{-1}/m_0, m-1, 0$ ;	
$T_s$	período de pico do espectro, $p$ ; e período significativo, $s$	s
$T_R$	Período de retorno	ano
$v$	Velocidade de escoamento	m.s <sup>-1</sup>
$V, V_{máx}$	Volume de galgamento; volume máximo de galgamento, $máx$	m <sup>3</sup> .m <sup>-1</sup>
$We, We_m, We_n$	Número de Weber; no modelo, $m$ ; e à escala natural, $n$	—
$\gamma, \gamma_b, \gamma_f$	Índices de redução do espraio e galgamento, devido: à influência de uma	
$\gamma_{f,surg}, \gamma_{f,mod}$	berma no talude da estrutura, $b$ ; à rugosidade e permeabilidade do talude, $f$ ; à	
$\gamma_\beta, \gamma_v$	rugosidade e permeabilidade do talude na incidência de ondas do tipo	
	colapsante, $\xi_{m-10} > 1.8$ , $f,surg$ , e do tipo arfante, $\xi_{m-10} > 5.0$ , $f,mod$ ; ao	
	ângulo de incidência das ondas, $\beta$ ; e à presença de um muro de tempestade, $v$	—
$\sigma_w$	Tensão superficial da água	N.m <sup>-1</sup>
$\cot(\alpha_d)$	Declive da estrutura abaixo da berma de talude da estrutura	—
$\cot(\alpha_u)$	Declive da estrutura acima da berma de talude da estrutura	—
$\tan(\alpha_B)$	Declive da berma de talude da estrutura	—
$\alpha, \alpha_i$	Ângulo do talude com a horizontal; imaginário, $i$	° (grau)
$\beta$	Ângulo de incidência das ondas, relativamente à normal da estrutura	° (grau)
$\Gamma$	Tempo de vida útil, ou escala temporal em análise	anos
$\delta, \delta_o, \delta_{op}$	Declividade da onda; declividade em águas profundas, $o$ ; e declividade em	
	águas profundas obtida a partir de $T_p, op$	—
$\varepsilon_r$	Altura relativa das ondas ( $\varepsilon_r = H/h$ )	—
$\theta$	Ângulo do fundo	° (grau)
$\mu$	Viscosidade dinâmica	Pa.s
$\xi, \xi_o, \xi_{m-1,0}$	Número de Iribarren, <i>surf similarity parameter</i> ; em águas profundas, $o$ ; obtido	
$\xi_{crit}, \xi_{op}, \xi_{tr}$	a partir de $T_{m-1,0}, m-1, 0$ ; crítico, <i>crit</i> ; obtido a partir de $T_p, op$ ; e obtido a partir	
	da onda na transição entre a distribuição de Rayleigh e a distribuição de	
	Weibull, <i>tr</i>	—
$\rho_w$	Massa volúmica da água	kg.m <sup>-3</sup>

## ACRÓNIMOS

AM	Águas mortas
AV	Águas vivas
AVE	Águas vivas equinociais
BMAV	Baixa-mar de águas vivas
BMmax	Baixa-mar máxima
BMmed	Baixa-mar média
BMmin	Baixa-mar mínima
CLASH	<i>Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping</i>
ECD	Estados de completo desenvolvimento do mar
FCUL	Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
FORTTRAN	<i>IBM Mathematical FORMula TRANslation System</i>

JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NM	Nível do mar
NMM	Nível médio do mar
PM	Preia-mar
PMAV	Preia-mar de águas vivas
PMAVE	Preia-mar de águas vivas equinociais
PMmax	Preia-mar máxima
PMmed	Preia-mar média
PMmin	Preia-mar mínima
SWL	Nível da superfície livre do mar ( <i>Still Water Level</i> )
ZH	Zero Hidrográfico

# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1.1. MOTIVAÇÃO

Durante o meu percurso profissional, vi-me confrontada com questões relacionadas com a fragilidade das zonas costeiras e a importância que estas ocupam na nossa sociedade. É sabido que as zonas costeiras enfrentam muitos desafios, destacando-se a subida do nível médio do mar, pressões de natureza antropogénica e meteorológica, interagindo com a dinâmica dos sistemas costeiros. Entendendo a multidisciplinariedade deste tema, propus-me aprofundar os meus conhecimentos através de um plano de estudos que acompanhasse essa mesma diversidade, daí a escolha do mestrado em Ciências do Mar, tendo ainda realizado a disciplina de Hidráulica e Obras Marítimas ministrada no Instituto Superior Técnico de Lisboa, em regime extracurricular. Assim, esta dissertação tem como finalidade a aplicação dos novos conhecimentos adquiridos no mestrado em Ciências do Mar da FCUL, conciliando-os com o meu *background* académico e profissional enquanto engenheira civil.

A frente costeira está sujeita ao forçamento das ondas, onde um dos fenómenos resultante desta interação é o galgamento das estruturas costeiras, sejam estas de cariz natural (e.g. dunas) ou artificial (e.g. estruturas de defesa costeira). O galgamento caracteriza-se pela passagem de uma lâmina de água sobre o coroamento da estrutura costeira por ação das ondas. Este fenómeno pode provocar danos à própria estrutura, assim como a pessoas e bens que se encontrem sobre a estrutura ou na zona por esta abrigada.

As áreas com risco associado a galgamentos costeiros estão abrangidas pela Resolução do Conselho de Ministros nº82/2009, que aprova a *Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira*. Neste documento prevê-se que sejam adotadas «medidas de ordenamento que permitam minimizar riscos e que restrinjam ou interditem a edificação na zona costeira, garantindo a sustentabilidade do território na área em causa». Para tal é necessário conhecer os riscos a que cada troço litoral está sujeito, tal como foi reconhecido pelos legisladores, que apontam como medida estratégica «Identificar e caracterizar as áreas de risco e vulneráveis e tipificar mecanismo de salvaguarda», e indicam como uma das metas «Elaborar estudo para identificar na zona costeira os diferentes tipos de risco e tipificar mecanismos de salvaguarda».

Para que se possam criar mecanismos de salvaguarda é necessário caracterizar e quantificar os eventos geradores de perigosidade/risco, neste caso os eventos de galgamento costeiro.

A problemática deste fenómeno prende-se com a dificuldade de estimar/quantificar os galgamentos, por um lado porque não existe uma formulação determinística exequível, por outro, devido aos muitos fatores de incerteza associados. Em resposta a estas adversidades, têm surgido, principalmente nas últimas décadas, projetos (e.g. o projecto *CLASH* (*Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard Analysis on permissible wave overtopping*)) e manuais técnicos (e.g. EurOtop (2007 e 2016), CEM (2002)) que reúnem ferramentas empíricas desenhadas para quantificar o galgamento e os seus efeitos, contribuindo para melhorar o estado do conhecimento.

A maioria dos estudos sobre galgamentos dedicam-se a estruturas de proteção costeira construídas para esse fim, rareando os estudos dedicados ao galgamento de estruturas naturais, de zonas artificializadas sem a premissa da proteção, ou ainda de situações mistas. Todas estas situações ocorrem no litoral português, e sofrem eventos de galgamento pondo em risco a segurança de pessoas e bens. Assim, este estudo pretende contribuir não apenas para o conhecimento da avaliação dos eventos de galgamento dessas estruturas, mas também como uma chamada de atenção para esta lacuna do conhecimento científico.

## 1.2. OBJETIVOS E ABORDAGEM METODOLÓGICA

O intuito deste estudo é avaliar a resposta de modelos de quantificação dos eventos de galgamento oceânico face a observações factuais de modo a avaliar o desempenho de formulações existentes, e avaliar a eficácia enquanto ferramentas de previsão da ocorrência de galgamento e possível utilização em sistemas de alerta.

Para cumprir os objetivos propostos, foi escolhido o litoral sul do concelho de Cascais, entre Cascais e Carcavelos. A escolha decorreu da existência de evidências de eventos de galgamento, que põem em causa a segurança de pessoas e bens, causam perturbações no normal funcionamento das zonas afetadas, e levam, recorrentemente, à interdição do passeio marítimo.

A abordagem adotada representa o compromisso possível entre considerar a diversidade de tipos de costa encontrada e obter uma visão geral de todo o litoral. Para efeitos de caracterização tipológica do litoral, foram escolhidos e analisados locais-tipo, considerados representativos da diversidade morfológica da área em estudo. Em cada local selecionado, foi feito o levantamento topográfico do perfil emerso através de medições *in situ*, utilizando equipamento de precisão: GPS Leica, operando em modo diferencial, em tempo real. A descrição do perfil submerso recorreu a dados topográficos de 2008 obtidos de ortofotomapas da área em estudo (DGTerritório, 2009), assim como do Modelo Digital de Terreno *LiDar* 2011 (DGTerritório, 2011).

Neste estudo, todas as cotas (altimétricas) e profundidades (batimétricas) estão referidas ao Zero Hidrográfico, ZH (um plano de referência convencional situado 2.08 m abaixo do nível médio do mar, NMM, de Cascais, 1938). Convencionou-se que as cotas são positivas para cima e as batimétricas têm o mesmo sinal no sentido oposto; ainda, os rumos estão referidos ao azimute com origem no norte.

Foi considerado o forçamento oceanográfico devido à agitação marítima através de dados reconstituídos, *hindcast*, ao largo da zona de estudo (39° N, 10° W) em águas profundas, de 6 em 6 horas entre 2009 e 2015. Estes dados foram obtidos através de um modelo numérico desenvolvido por Bertin *et al.* (2013) que tem por base o modelo espectral WaveWatch III (Tolman, 2009). A propagação das ondas para a costa foi efetuada utilizando o modelo SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*, (SWAN, 2018)), como descrito no subcapítulo 3.6.2.. O forçamento associado às variações do nível do mar foi considerado recorrendo aos registos do marégrafo de Cascais (DGTerritório, 2018), incluindo assim a maré astronómica e a componente de origem meteorológicas (*storm surge*).

Foi feito um levantamento dos modelos existentes de cálculo de galgamento, e escolheram-se as formulações que se consideraram mais adequadas a cada perfil-tipo abordado neste trabalho.

Assim, o caudal médio galgado foi obtido com recurso ao método empírico de Mase *et al.* (2013) ou através da rede neuronal NN\_Overtopping 2 (Coeveld *et al.*, 2005), conforme o caso, e os resultados foram comparados com os obtidos através de um método genérico constante no EurOtop (2016).

A validação dos resultados foi feita recorrendo a análise comparativa dos resultados modelados com eventos de galgamento observados e compilados em registos documentais.

### **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos. No primeiro é feita a introdução à dissertação, onde são apresentados os objetivos e se apresenta uma abordagem geral à metodologia adotada. No segundo capítulo faz-se uma breve descrição dos conceitos de base e inclui-se uma súmula do estado da arte, indicando os principais agentes responsáveis pelos galgamentos e parâmetros descritores e os tipos de estruturas costeiras passíveis de serem galgadas; apresenta-se ainda uma breve abordagem à avaliação do risco.

O terceiro capítulo é dedicado à aplicação ao litoral sul do concelho de Cascais, começando por um enquadramento geral, seguindo-se o levantamento histórico de eventos de galgamento; descreve-se a diversidade geomorfológica e de estruturas costeiras do litoral em estudo, apresentam-se os dados de entrada dos forçamentos oceanográficos, descrevem-se e analisam-se os resultados por perfis, e discute-se a validação dos resultados dos modelos recorrendo aos impactos conhecidos de duas tempestades.

Por último, apresentam-se as conclusões do trabalho e avançam-se algumas sugestões para trabalhos futuros sobre esta temática.

## 2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

### 2.1. ESTRUTURAS COSTEIRAS

Os sistemas costeiros apresentam, normalmente, estruturas naturais sob a forma de acidentes geomorfológicos notáveis que servem de proteção à agitação marítima e deste modo evitam a ocorrência de galgamentos e inundações. No caso dos litorais rochosos altos e escarpados, estes acidentes são constituídos por formações rochosas cortadas por arribas, a que se associa frequentemente uma plataforma de abrasão. Já no caso dos litorais baixos e arenosos, desenvolvem-se sistemas praia-duna, onde a duna fornece proteção contra inundações (Figura 2.1).

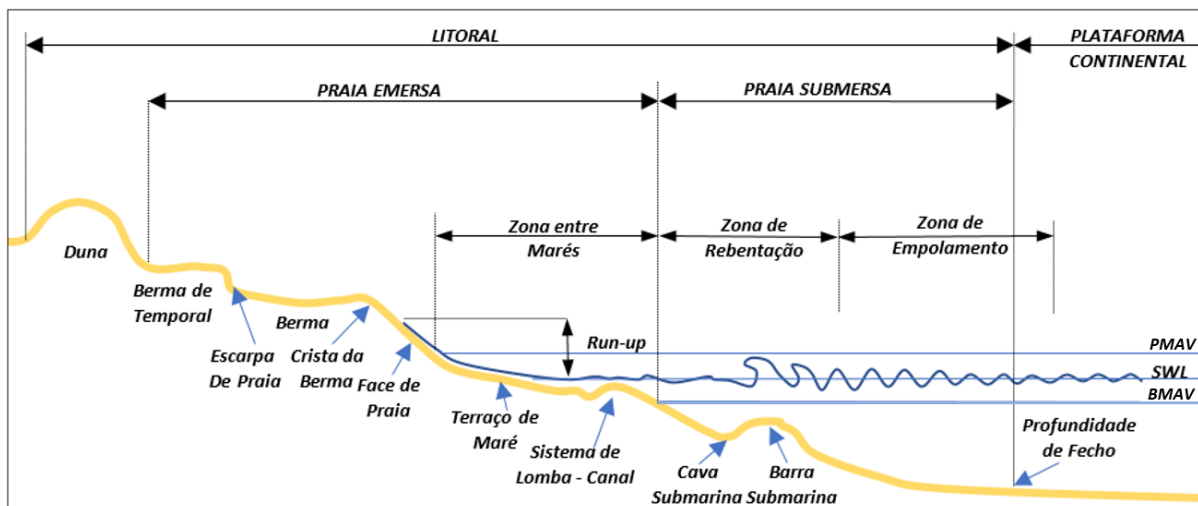


Figura 2.1. Nomenclatura adotada do zonamento da praia (<http://www.aprh.pt/rgci/glossario/praias.html>)

No entanto, por vários motivos, estes sistemas naturais podem não ser suficientes para evitarem os referidos galgamentos e inundações. Neste caso, as frentes marítimas podem sofrer intervenção antropogénica com o objetivo de estabilização da linha de costa ou, tão simplesmente, para a proteção de bens imóveis, infraestruturas ou pessoas. Estas intervenções são normalmente designadas como intervenções de proteção costeira quando a função é a estabilização da linha de costa, e como de defesa costeira quando se destinam à proteção contra as inundações por galgamento.

Nesta dissertação entende-se por estruturas ou defesa costeira naturais os sistemas dunares e arribas, e por artificiais todas as estruturas de proteção e defesa costeira construídas para esses fins. As estruturas de defesa costeira a considerar neste estudo são:

- Defesas costeiras artificiais – Diques; Estruturas longitudinais aderentes, como paredões (*Seawall*).
- Defesas costeiras naturais – Dunas e arribas.

Segundo CEM (2002), as estruturas artificiais podem ser divididas em dissipativas e não dissipativas, conforme se ilustra na Figura 2.2., com alguns exemplos de estruturas de proteção aderentes.

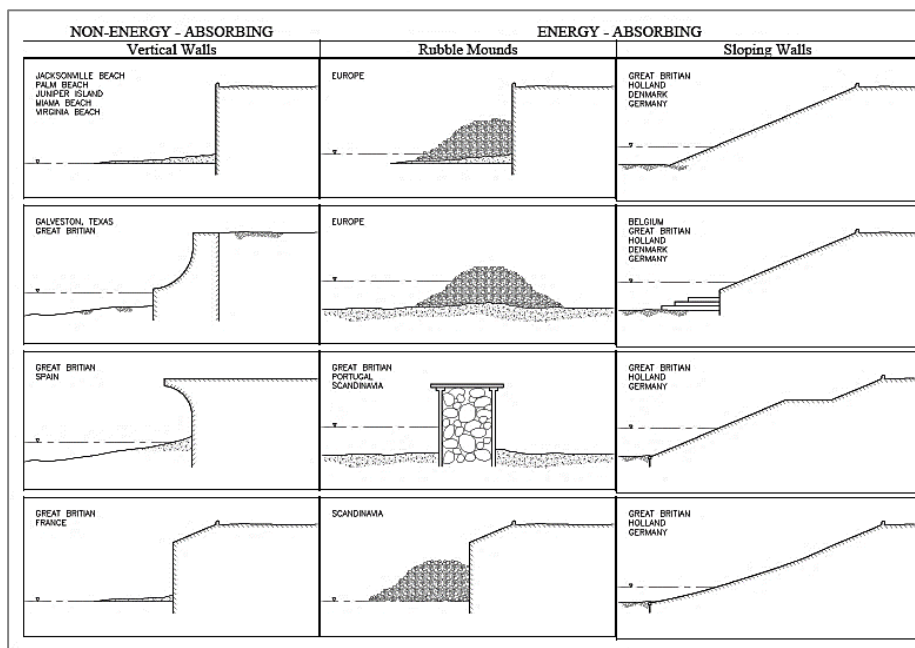


Figura 2.2. Diferentes tipos de paredões e diques. (Pilarezyk, 1990, em CEM, 2002)

## 2.2. GALGAMENTO COSTEIRO

O galgamento costeiro ocorre quando a água ultrapassa o coroamento da estrutura costeira por ação das ondas, podendo ocorrer na forma de uma lâmina de água (*'green water'*), ou na de salpicos/spray (*'white water'*) (EurOtop, 2016).

Nos casos de *'white water'*, o galgamento acontece quando a rebentação se dá sobre a face da estrutura, provocando um volume significativo de gotículas de água no formato de salpicos ou *spray*. A nuvem de gotículas pode ultrapassar o coroamento da estrutura e avançar no sentido de terra, tanto através do seu momento próprio como através de transporte eólico (EurOtop, 2016). Este tipo de galgamento pode reduzir a visibilidade aos automobilistas, principalmente em veículos que circulem a média e alta velocidade em autoestradas ou vias rápidas costeiras. Mais ainda, pode ser incomodativo em vias para pedestres. Note-se também que o "spray" de água do mar é particularmente agressivo para as construções costeiras, provocando corrosão, podendo originar degradação acelerada dos materiais de construção (EurOtop, 2007).

O presente estudo foca-se nos galgamentos do tipo *'green water'* sobre estruturas aderentes, sejam estas de cariz natural ou artificial, que ocorrem quando uma lâmina de água ultrapassa o coroamento da estrutura por ação das ondas e escoar para o seu tardo. Este processo decorre do balanço energético resultante da interação da onda sobre a estrutura. Parte da energia pode ser dissipada por atrito e/ou por percolação, mas quando a massa de água em movimento ultrapassa a cota de coroamento da estrutura ocorre o galgamento por *'green water'* (Figura 2.3).

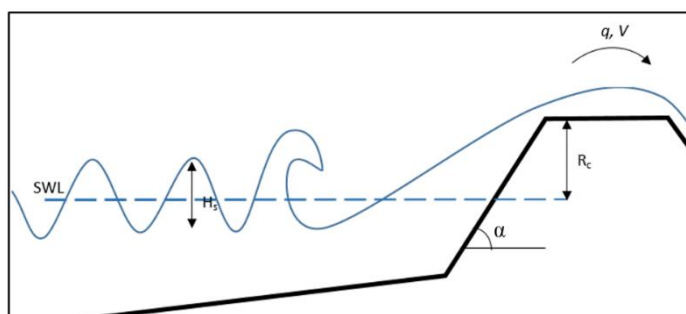


Figura 2.3. Esquema de galgamento, *'green water'*



A transposição de uma estrutura aderente por uma massa de água depende (entre outros fatores) da cota do coroamento face à cota alcançada pelo agente de forçamento, neste caso, a frente de lâmina de água em movimento. O manual EurOtop de 2016, classifica os coroamentos, relativamente ao nível da superfície livre do mar em repouso, SWL, como ilustrado na Figura 2.4.

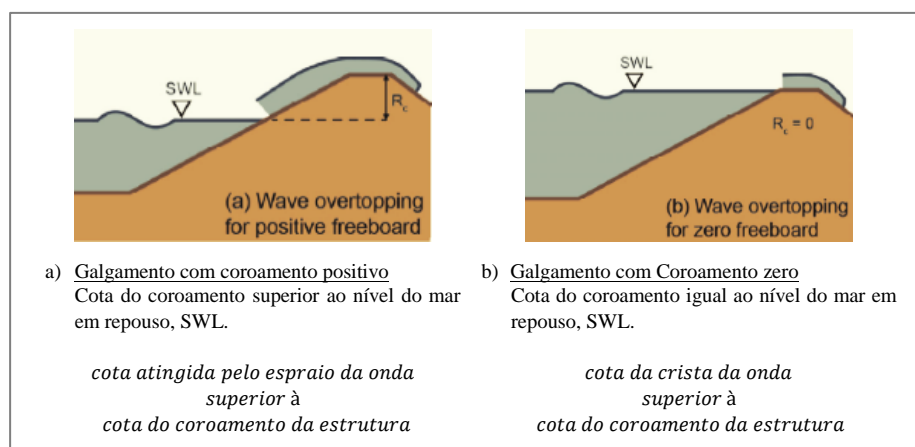


Figura 2.4. Tipos de galgamento conforme coroamento da estrutura costeira (EurOtop, 2016)

O nível de água em repouso é influenciado por um conjunto de fatores de forçamento (cf. Subcapítulo 2.2.1 *Forçamentos oceanográficos*). Normalmente, o ‘green water’ ocorre quando se dá a coincidência de um nível do mar elevado com uma forte agitação marítima, havendo, para além do efeito aditivo destes dois fatores, a potenciação dos efeitos da agitação marítima devido à elevação excecional da superfície livre do mar.

Para descrever o fenómeno utilizam-se parâmetros que caracterizam os agentes forçadores e as condições de fronteira (Figura 2.5).

A magnitude do galgamento costeiro pode ser expressa em termos de caudal médio galgado,  $q$ , ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) ou volume galgado,  $V$ , ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ ), ou seja, caudal e volume por metro linear do coroamento, respetivamente. Devido à aleatoriedade de parte dos fenómenos que causam galgamentos, estes serão muito variados em tempo e volume envolvido, pelo que a média,  $q$ , poderá afastar-se muito dos volumes máximos atingidos,  $V_{\text{máx}}$ . No entanto, o caudal médio galgado é mais fácil de estimar, recorrendo-se com frequência a este parâmetro para estimar, caracterizar e comparar a intensidade dos galgamentos (EurOtop, 2007).

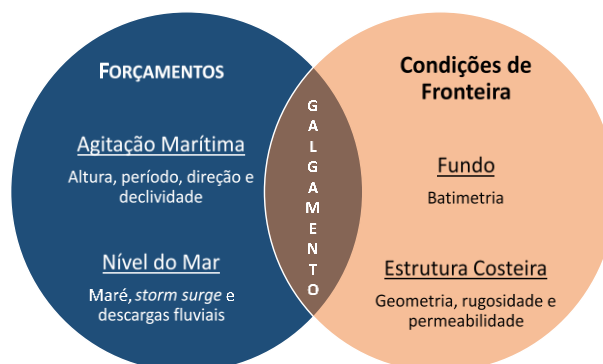


Figura 2.5. Parâmetros que condicionam o galgamento

Neste trabalho consideram-se como agentes forçadores da ocorrência de galgamentos a agitação marítima e o nível do mar; não serão abordados os efeitos dos ventos locais sobre a dinâmica marítima costeira, nem das correntes marítimas e fluviais.

## 2.2.1. Forçamentos Oceanográficos

### Agitação Marítima

As ondas possuem diferentes origens consoante o agente que esteve envolvido no seu processo de geração. As ondas podem ser de origem atmosférica, astronómica ou tectónica. Na Figura 2.6 é possível ver a relação entre os vários tipos de ondas (conforme a sua frequência) e o nível energético associado.

Na caracterização de regime de agitação marítima apenas se analisam as ondas de vento, de mais alta frequência (Figura 2.6). Faz-se notar que, as ondas causadas por sobrelevação meteorológica (*storm surge*), igualmente de origem atmosférica, serão abordadas mais adiante neste subcapítulo, tal como as de origem astronómica (marés), principalmente por se manifestarem numa escala temporal superior, logo menos dinâmico, do que as ondas de vento.

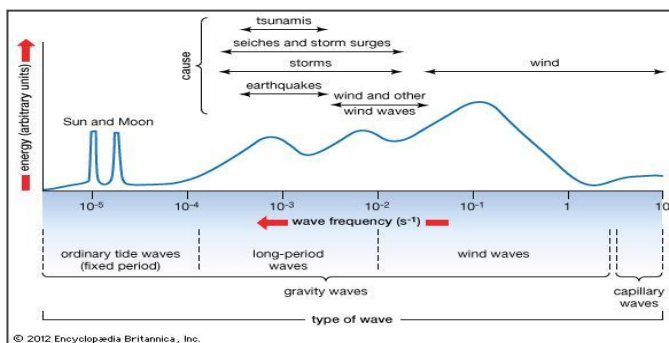


Figura 2.6. Tipos de onda e respectivos níveis de energia relativa (Ronald, 2011)

Em Portugal continental, a agitação marítima é sobretudo causada por tempestades extratropicais, que se formam no Atlântico Norte (Antunes, 2014), com *fetch* suficientemente grande para atingir estados de completo desenvolvimento do mar (ECD). Estas tempestades, do quadrante noroeste (Antunes, 2014) chegam a costa portuguesa, fustigando principalmente os troços mais expostos, no litoral oeste.

### Caracterização das ondas de vento

Para o estudo de galgamento oceânico, as ondas de vento serão caracterizadas através dos seguintes parâmetros:

**Altura de onda,  $H$**  - Distância vertical entre a crista e a cava. Por conveniência, e devido à irregularidade que caracteriza as ondas de vento, a altura significativa ( $H_s$ ) é o valor comumente utilizado, representando a média do terço das alturas das ondas mais altas observadas durante um certo intervalo de tempo,  $t$ . A sua aplicabilidade deve-se a ser o valor estatístico que melhor se aproxima da estimativa visual que um observador experimentado faz do estado do mar, possibilitando assim utilizar valores de registos antigos (não instrumentados). Quando se utiliza uma análise espectral na caracterização do estado do mar, determina-se a altura significativa  $H_{m0}$ , designada por altura de onda espectral, sendo  $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$ , onde  $m_0$  é o momento de ordem zero do espectro (EurOtop, 2007).

**Comprimento de onda,  $L$**  - Distância horizontal entre duas cristas (ou quaisquer dois pontos na mesma fase) consecutivas.  $L_0$  é o comprimento de onda ao largo (em águas profundas).

**Período da onda,  $T$**  - Tempo necessário para a onda percorrer a distância de um comprimento de onda,  $L$ . Por convenção, o período da onda,  $T$ , é o período de pico potência do espectro,  $T_p$ , dado pelo pico do espectro de distribuição de energia [EurOtop, 2007]. No entanto, dependendo das formulações e das respostas a analisar, podem ser considerados outros parâmetros descritores do período, por exemplo, o período médio,  $T_m$ , calculado através do espectro ou através da análise de séries de registos, ou o período

significativo,  $T_s$ , sendo este a média dos períodos do terço das maiores ondas observadas num determinado intervalo de tempo.

**Rumo da Onda,  $Dir$**  – O rumo da onda é medido em unidades angulares, graus, em relação ao Norte, com valor positivo no sentido horário, podendo ser descrito pelo seu rumo médio ou rumo de pico.

**Velocidade de fase ou celeridade,  $c$**  - Velocidade de propagação da forma da onda,  $c = L/T$ . Este parâmetro responde às características do local onde as ondas se estão a propagar. Se em águas profundas (meio dispersivo),  $c \approx \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$ , ou em águas pouco profundas (meio não dispersivo),  $c \approx \sqrt{gh}$ .

**Declividade da onda,  $\delta$**  - A declividade da onda é definida pelo rácio entre a altura da onda,  $H$ , e o seu comprimento,  $L$ , sendo,  $\delta = H/L$ . A declividade traduz algumas características das ondas, tais como a proximidade à área de geração, se corresponde a ondulação (*swell*) gerada ao largo e afetada por dispersão, ou se corresponde a vaga (*sea*), gerada por ventos locais.

### Processos de Transformação das ondas

O comportamento de uma onda de vento em meios dispersivos assemelha-se ao de uma onda superficial oscilatória progressiva pura, transportando apenas energia, porque o transporte de massa (Deriva de Stokes) é muito pequeno, sendo um efeito de segunda ordem. Este comportamento é próprio de ondas em águas profundas, onde  $h > L_0/2$ , Figura 2.7(a). Nestas condições considera-se a velocidade de propagação (celeridade) constante, pois apenas depende do comprimento de onda,  $c \approx \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$  (CEM, 2002).

Quando as ondas se aproximam da costa, as condições de fronteira começam a interferir com a livre propagação da onda provocando transformações. Admite-se que a onda “sente” o fundo quando a profundidade local é inferior a  $L_0/2$  (águas intermédias se  $L_0/2 > h > L/20$ , Figura 2.7(b), e pouco profundas se  $h < L/20$ , Figura 2.7(c)). Nestas condições, a onda de gravidade encontra-se em meio não dispersivo, caracterizado pela dependência da celeridade à profundidade; no limite, pode considerar-se que apenas depende da profundidade e da aceleração da gravidade,  $c \approx \sqrt{gh}$ , como é característico de propagação em águas pouco profundas (*shallow waters*) (Segar & Segar, 2012).

Não é apenas a redução de profundidade que provoca modificações na onda, mas sim todas as condições geomorfológicas de fronteira. Os processos mais significativos relacionados com estas condições são: (i) empolamento; (ii) refração; (iii) difração; (iv) reflexão; (v) rebentação; e (vi) espraio. Na realidade, todos os processos interferem entre si, no entanto é prática corrente analisá-los individualmente (Carmo, 2016)

- (i) **Empolamento (*Shoaling*)** - Na aproximação à costa, assim que a onda “sente” o fundo, a celeridade diminui com a diminuição da profundidade, provocando um aumento da altura e uma diminuição do comprimento, mantendo o período invariável (considerando-se a onda

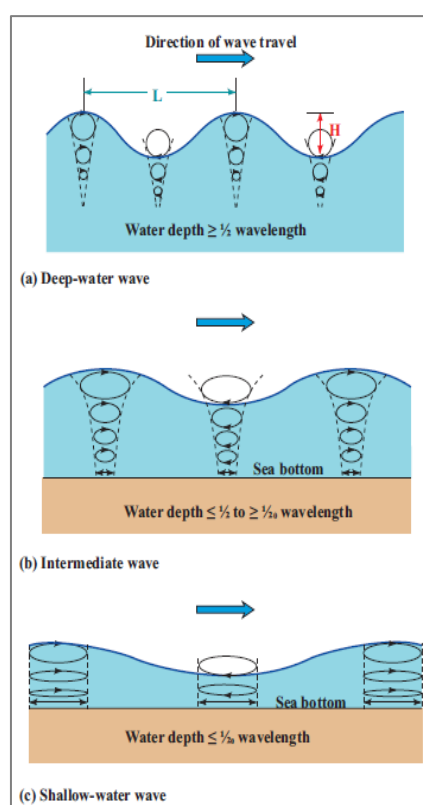


Figura 2.7. Efeitos da profundidade do fundo sobre o movimento orbital e perfis das ondas de vento (Segar & Segar, 2012)

como um sistema conservativo em termos da energia total transportada). O efeito de aumento da altura das ondas induzido pela diminuição da profundidade é traduzido pelo coeficiente de empolamento,  $K_s$ . No entanto, em águas intermédias, dá-se uma pequena diminuição da altura,  $K_s < 1$ , provocada por um aumento temporário da velocidade de grupo e após esta fase dá-se um rápido aumento da altura, correspondendo a um coeficiente  $K_s > 1$  (Komar, 1976).

- (ii) **Refração** - Quando se dá uma propagação não perpendicular da onda face à batimetria de fundo, a onda sofre uma mudança de direção, descrita pela Lei de Snell, tendendo as cristas a alinharem com a batimetria e a linha de costa. Os efeitos de refração sobre a altura da onda são quantificados pelo coeficiente de refração,  $K_r$ . Este fenómeno é facilmente visível em cabos (Figura 2.8) (expressão da existência de um tergo submarino), com a convergência das ortogonais (linhas perpendiculares à frente da onda), induzindo aumento da densidade de energia nesse local, com  $K_r > 1$ . Nas baías (expressão na linha de costa de um vale ou fundão submarino), dá-se o oposto, a divergência das ortogonais (Figura 2.8), sendo estes locais pouco energéticos relativamente às condições ao largo,  $K_r < 1$ .

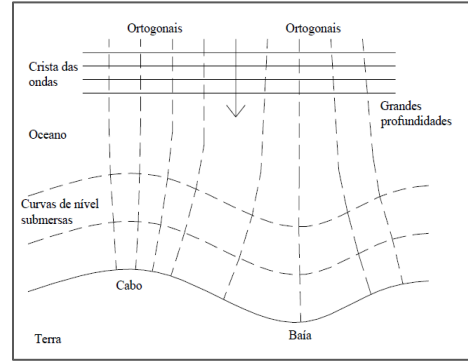


Figura 2.8. Representação esquemática do fenómeno de refração (Carmo, 2016)

- (iii) **Difração** - Quando as ondas encontram um obstáculo à sua livre propagação, como no caso de promontórios, quebramares, ou defesas projetadas (e.g. molhes em portos de abrigo), as ondas difratam assim que ultrapassam a extremidade livre. A difração consiste numa distribuição espacial do fluxo de energia da zona de maior energia, da crista da onda para a região de menor energia, por exemplo, na retaguarda do obstáculo (Figura 2.9). A quantificação do efeito de difração na altura da onda é obtida através do coeficiente de difração,  $K_d$ . Este fenómeno produz sempre uma diminuição da altura de onda, pelo que  $K_d$  varia entre zero e um.

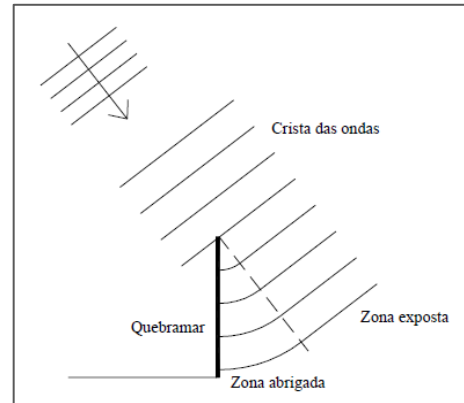


Figura 2.9. Representação esquemática do fenómeno de difração (Carmo, 2016)

Estes processos, (i), (ii) e (iii), influenciam a altura de onda durante a propagação, que é modelada através da aplicação dos coeficientes de empolamento,  $K_s$ , refração,  $K_r$  e difração,  $K_d$ . Assim a altura da onda num ponto  $x$  do domínio de propagação da onda,  $H_x$ , pode ser calculada por:

$$H_x = H_o K_s K_r K_d \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Quando a onda atinge a zona de rebentação, pode já ter sofrido os efeitos atrás mencionados, utilizando-se a Equação (Eq. 2.1) para determinar a altura da onda na rebentação,  $H_b$ .

A relação entre a declividade da onda e o declive do fundo determina que haja ou não rebentação da onda. Em 1949, Iribarren e Nogales criaram um índice que representa esta relação, designado por *Número de Iribarren*,  $\xi$ , ou *Surf Similarity Parameter*,  $\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\delta}}$ .

onde  $\tan \theta$  é o declive do fundo e  $\delta$  a declividade da onda. A partir deste quociente é possível prever se a onda irá ser essencialmente refletida na interação com a fronteira ou se irá ocorrer a rebentação. No entanto, sabe-se que este parâmetro tem várias interpretações físicas, pelo que concentra em si um vasto leque de relações, tais como o tipo de rebentação ou a relação entre a altura da onda na rebentação e a profundidade da rebentação (Battjes, 1974).

- (iv) **Reflexão** - Quando uma onda atinge um obstáculo rígido dá-se uma inversão da direção de propagação dos raios da onda, este fenómeno entende-se por reflexão da onda (RGCI, 2007). Segundo a Lei da Reflexão, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (Figura 2.10) (RGCI, 2007). O coeficiente de reflexão,  $R$ , é dado pela relação entre a altura de onda refletida e incidente. O grau de reflexão depende das características da onda (declividade,  $\delta$ , e altura relativa,  $\varepsilon_r = H/h$ ) e das características do paramento (inclinação do talude, rigidez, rugosidade e porosidade), que controlam a dissipação de energia. No limite, a incidência perpendicular a um paramento vertical resulta em reflexão total, formando-se ondas estacionárias, “clapotis”, com  $R=1$  (Carmo, 2016).

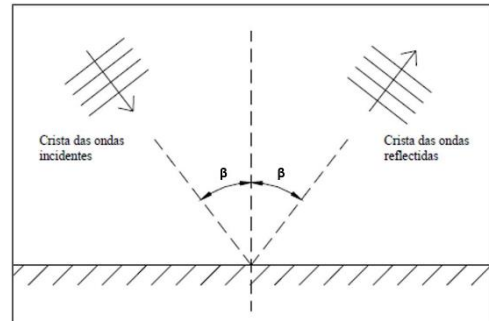


Figura 2.10. Representação esquemática do fenómeno de reflexão (Carmo, 2016)

- (v) **Rebentação** - Pode-se considerar a rebentação como o último estágio de “vida” de uma onda, enquanto fenómeno essencialmente oscilatório. Se o meio não for propício à reflexão, com o decrescer da profundidade a declividade da onda aumenta, até atingir um estado de instabilidade e rebenta, o que provoca uma grande dissipação de energia, acompanhada de turbulência e emulsão de ar, limitando a altura da onda. Usualmente, a profundidade de rebentação,  $d_b$ , é estimada a partir da seguinte relação,  $d_b = H_b/0.6$ , para ondas irregulares (CEM, 2002). A rebentação pode ser classificada, genericamente, em três tipos (Figura 2.11): progressiva (*spilling*), mergulhante (*plunging*) e arfante (*surgings*). As diferenças comportamentais na rebentação devem-se essencialmente à relação entre o declive do fundo,  $\tan \theta$ , e a declividade da onda,  $\delta$ . Daí o Número de Iribarren ser um bom descritor do fenómeno, como já foi mencionado. O Número de Iribarren relaciona a geometria da onda com a do talude, e através deste é possível estabelecer a relação entre a reflexão e a rebentação em função de um valor crítico,  $\xi_{crit}$ , que estabelece a fronteira entre estes efeitos, descrito no seguinte intervalo,  $2.0 < \xi_{crit} < 2.5$

$\xi < \xi_{crit} \rightarrow$  ocorre rebentação da onda sobre o talude; a dissipação de energia é intensa e a reflexão é pequena;

$\xi > \xi_{crit} \rightarrow$  não ocorre rebentação; a dissipação de energia só depende da porosidade e rugosidade do talude; grande parte da energia é refletida ( $R \approx 1$ ).

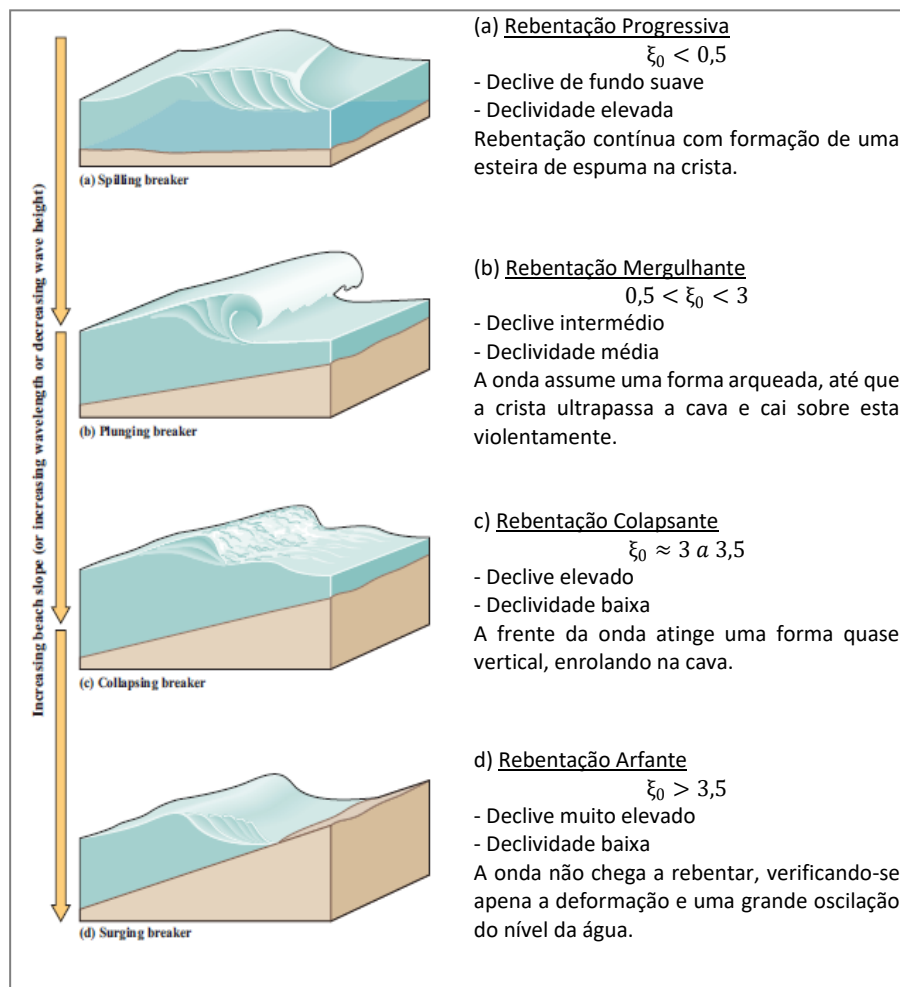


Figura 2.11. Representação dos vários tipos de rebentação (Segar & Segar, 2012)

(vi) **Espraio e Run-up** - A lâmina de água ascendente sobre uma estrutura resultante da rebentação de uma onda incidente, designa-se por espraio (*swash*) e a do retorno ao mar por ressaca (*backswash*) (RGCI, 2007). O espraio da onda resulta do balanço energético da interação da onda sobre a estrutura. A energia cinética é convertida em energia potencial, provocando o transporte de massa de água sobre o talude da estrutura, e parte da energia pode ser dissipada por atrito e/ou por percolação. A avaliação deste fenómeno pode ser feita através do cálculo do *run-up*,  $R_u$ , sendo este parâmetro a distância medida na vertical entre o nível da superfície livre do mar e a cota atingida pelo espraio da onda. No estudo dos galgamentos, utiliza-se o *run-up* excedido por 2% das ondas incidentes,  $R_{u,2\%}$ . Assim, genericamente, o *Run-up* depende de:

- Onda: altura,  $H$ , e declividade,  $\delta$ ;
- Reflexão,  $R$ ;
- Talude: declive, rugosidade, permeabilidade, porosidade, nível freático;
- Ângulo de incidência da onda,  $\beta$ .

A magnitude do *run-up*, pode ser estimada recorrendo a uma vasta gama de formulações, todas elas empíricas, nas quais varia o número de parâmetros considerados e as condições para as quais foram obtidas. Teixeira (2014) identificou 60 formulações diferentes. No geral, todas estas formulações têm por base as características da agitação marítima e das condições da fronteira costeira, mas em alguns casos a sua replicabilidade é muito difícil



devido à grande variabilidade de condições da fronteira costeira. Uma formulação genérica, para taludes suaves e impermeáveis, pode ser escrita da seguinte forma (EurOtop, 2007):

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = c_1 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0}, \quad (Eq. 2.2)$$

com máximo em,

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \left( c_2 - \frac{c_3}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right), \quad (Eq. 2.3)$$

onde  $c_1, c_2$  e  $c_3$  são coeficientes empíricos, e  $\gamma_b, \gamma_f, \gamma_\beta$  são coeficientes de redução que pretendem transcrever o efeito da existência de uma berma no talude da estrutura, da rugosidade e permeabilidade do talude e do ângulo de incidência das ondas, respetivamente, no espraio da onda rebentada.

Em taludes suaves, o alcance do espraio aumenta rapidamente e de forma linear com  $\xi_{m-1,0}$ , para ondas que rebentam, ou seja, para valores de  $\xi_{m-1,0} < \xi_{crit}$ . Para ondas colapsante/arfantes, que não rebentam, a taxa de crescimento do *run-up* é menos acentuada.

#### Modelos de propagação da agitação marítima

A modelação da propagação das ondas de águas profundas até à costa pode ser feita através de várias técnicas, de forma a simular os vários processos de transformação das ondas. Alguns exemplos de tipos de modelação (Carmo, 2016), e considerações genéricas podem ser encontrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Modelos de propagação de agitação marítima (adaptado de Carmo, 2016)

Tipo de Modelos	Breve Descrição	Exemplos de Modelos	Empolamento	Difração	Refração de fundo	Refração ondas/correntes	Dissipação de energia por atrito de fundo	Rebentação	Interação onda/onda	Reflexão
Modelos de refração espectral	Baseia-se na equação de conservação da ação da onda.	COWADIS								
		MIKE21-NSW								
		SWAN								
		STWAVE								
Modelos de refração-difração	Incluem os efeitos combinados da refração e da difração.	ARTEMIS								
		MIKE21-PMS								
		RD-2DH								
		REFDIF v2.5								
		MEGA								
Modelos de ondas não lineares dispersivas	Integração analítica da equação da conservação da quantidade de movimento segundo a direção vertical.	MIKE21-BW								
		MOHID								
		WAVES-2DH								

## Variações do Nível do Mar

É de fácil percepção que as alterações do nível do mar têm uma influência direta nos fenómenos de espraio e galgamento, podendo ser fator determinante do galgamento, visto que é sobre a superfície livre do oceano que os forçamentos dinâmicos das ondas se vão fazer sentir. Além disto, este efeito potencia a altura da onda: o aumento da coluna de água permite que a onda se desenvolva em altura, e mais perto da costa se dará a rebentação, caso esta chegue a ocorrer.

Existem vários fatores que alteram o nível do mar, variando a escala temporal e a previsibilidade dos mesmos.

**Maré astronómica** - As marés astronómicas são devidas às forças, de natureza essencialmente gravitacional, desenvolvidas pelo sistema Sol-Terra-Lua. A estas somam-se os efeitos da rotação da Terra e os efeitos locais das fronteiras. As marés astronómicas atingem amplitudes mais elevadas em situação de sizígia e são particularmente amplificadas durante os equinócios, designando-se de maré vivas equinociais. As marés podem ser classificadas quanto ao seu período, em diurnas, semidiurnas ou mistas. Podem também ser utilizadas para caracterizar o litoral quanto à sua amplitude: microtidal (<2 m), mesotidal (entre 2 e 4 m) e macrotidal (>4 m), segundo Davies (1964) e Hayes (1979) citado em Schwartz, 2006). No caso português, as marés são semidiurnas (12:25 h de período), com desigualdade diurna pouco acentuada, registando-se uma magnitude de desigualdade diurna superior em águas mortas (AM) e em preia-mar de águas vivas equinociais (PMAVE). A amplitude média da maré astronómica, no litoral de Portugal continental, é de 2.10 m, aproximadamente, atingindo 3.60 m em AV (Antunes, 2013). Apesar das alterações significativas no nível do mar da responsabilidade da maré astronómica, estas são bem conhecidas e possíveis de prever, pelo que *per si* não constituem fator de risco. No entanto, quando a fase de PM coincide com outros forçamentos, geram-se efeitos aditivos e até potenciadores (como o caso da agitação marítima), podem gerar situações de risco.

**Sobrelevação meteorológica (*storm surge*)** - O efeito local da elevação do nível do mar, devido a efeitos meteorológicos, é conhecido na literatura anglo-saxónica por *storm surge*. São vários os forçamentos meteorológicos que podem provocar a sobrelevação do nível do mar. Uma causa frequente é a passagem de massas de ar que originam um campo de baixa pressão atmosférica sobre a superfície do oceano, tomando relevância aquando da passagem de tempestades (ciclones tropicais e extratropicais). Por exemplo, o decréscimo de 1 mb da pressão atmosférica produz uma elevação adicional do nível do mar de 1 cm, aproximadamente, sendo esta alteração conhecida pelo “Efeito do barómetro invertido” (Schwartz, 2006). Em Portugal continental, a sobrelevação deste tipo, mais relevante, relaciona-se com tempestades subtropicais com um centro de baixas pressões em deslocamento do quadrante sudoeste, afetando principalmente a costa sudoeste (Antunes, 2014). Outra causa relevante são os campos de tensões provocadas pelo vento intenso e persistente sobre a superfície do mar, que gera o arraste da camada mais superficial do oceano, medida em forças horizontais por unidade de área. Esta força depende da velocidade do vento e da densidade do ar. O efeito do vento é inversamente proporcional à profundidade da água; logo, quando o vento sopra sobre águas pouco profundas o efeito de arraste é amplificado. Na aproximação à costa, a força do vento associada à sua direção em relação à linha de costa pode causar elevação relevante do nível do mar. Quando o vento sopra perpendicularmente à linha de costa para terra provoca empilhamento da água, e o efeito inverso ocorre quando se faz sentir no sentido oposto (Schwartz, 2006). No litoral, a magnitude da sobrelevação depende da intensidade do forçamento (seja ele barométrico ou de tensão induzida pelo vento) e das condições geomorfológicas locais (configuração da linha de costa e batimetria) (Schwartz, 2006). A sobrelevação meteorológica em zonas extensas e de águas pouco profundas tem um impacto importante (EurOtop, 2007). A previsão da ocorrência de sobrelevações meteorológicas é inteiramente empírica, recorrendo a séries longas de dados. No entanto, são poucos os locais onde existem dados suficientes,



sendo necessário recorrer a modelos matemáticos. Vieira *et al.* (2012) analisaram os registos horários da maré de Cascais entre 1960 e 2010, e determinaram as amplitudes máximas para os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, a saber 58, 62 e 67 cm, respetivamente.

**Sobrelevação e depressão pelas ondas (*wave setup/setdown*)** - O processo de rebentação de uma onda induz uma alteração do nível de repouso, provocando uma depressão imediatamente antes de iniciada a rebentação e sob o ponto de rebentação e, de seguida, uma elevação, causada pela transferência de momento (FEMA, 2005).

**Descarga Fluvial** - Em locais sob influência de descargas fluviais importantes, como a foz de grandes rios, pode ocorrer a coincidência de níveis de água elevados com descargas fluviais de pico, aumentando temporariamente o nível do mar. Os eventos de descarga extrema podem atingir durações superiores a uma semana, aumentando a possibilidade de coincidência com fases de PMAV e episódios de tempestade (EurOtop, 2007).

**Subida do Nível Médio do Mar** - Segundo o Relatório *Climate Change 2014* (IPCC, 2014), a taxa de subida do nível médio do mar na segunda metade do séc. XIX foi bastante superior à taxa de subida dos últimos dois milénios, tendo-se mantido o sinal duma tendência nos sécs. XX e XXI. Entre 1901 e 2010 o nível médio do mar global subiu em média 0.19 m. As projeções fornecidas pelo relatório supracitado, apontam para subidas médias globais que podem atingir 1 m em 2100, face ao NMM entre 1986 e 2005 (Figura 2.13). Este fenómeno não é homogéneo em todas as regiões, prevendo-se que no final do séc. XXI, 95% do oceano tenha sofrido aumento do NMM e que em 70% das linhas de costa de todo o mundo o NMM suba  $\pm 20\%$  em relação à média global projetada. Mais, prevê-se que seja muito provável que em algumas regiões se verifiquem os extremos das previsões (IPCC, 2014). Portugal segue a tendência mundial de subida do NMM, tendo-se registado no marégrafo de Cascais uma taxa secular de elevação  $1.3 \pm 0.1$  mm/ano no século XX (Alveirinho Dias & Taborda, 1988). Já entre 1920 e 2000 esta taxa aumentou para 1.9 mm/ano e, mais recentemente, apresenta valores de 4.1mm/ano, entre 2005 e 2016 (Antunes, 2016), Figura 2.13. O NMM de referência em Portugal corresponde à média dos valores médios anuais entre 1882 e 1938, estabelecido para o *Datum Altimétrico Nacional de 1938* (NMM1938), e deste referencial até 2014 verificou-se um aumento total de 0.18 m (Antunes, 2016).

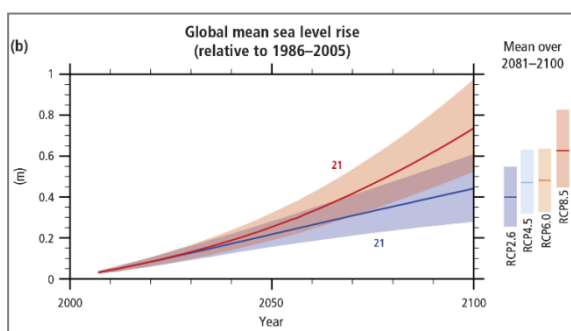


Figura 2.13. Cenários de subida do nível médio do mar para o período 2006-2100 (relativo a 1986-2005) (IPCC, 2014)

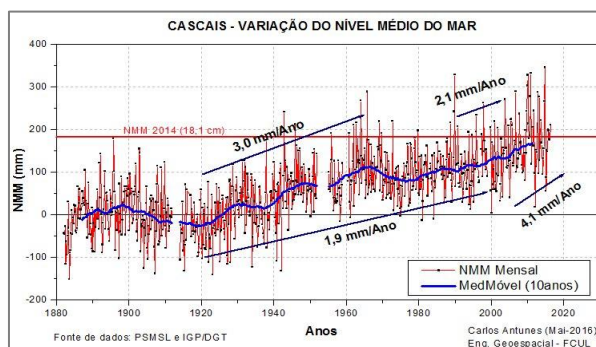


Figura 2.13. Variação do nível médio do mar registado no marégrafo de Cascais (Antunes, 2016)

### 2.2.2. Enquadramento Geral dos Modelos de Cálculo do Galgamento

O galgamento costeiro depende de um conjunto de fenómenos estocásticos (e.g. agitação marítima, ventos) o que, aliado ao facto de as faixas costeiras serem geomorfologicamente muito diversificadas, transforma a previsão do galgamento numa tarefa árdua e imprecisa. Daqui resulta uma grande panóplia de modelos e fórmulas empíricas, desenhadas para condições específicas; porém até ao momento, «*Nenhum destes métodos garante, universalmente, os melhores resultados*» (EurOtop, 2016).

Ao longo das últimas décadas, foram sendo desenvolvidos diferentes modelos, por tipo e características de estrutura de defesa (geometria, rugosidade, etc.), que recorrem a parametrizações distintas.

Dos modelos existentes, EurOtop (2016) enumera os seguintes:

- Modelos Empíricos
- PC-Overtopping
- CLASH database
- Redes Neurais
- Modelos Numéricos
- Modelos físicos

Neste subcapítulo faz-se uma breve descrição destes e apresenta-se uma abordagem geral ao cálculo dos principais parâmetros que descrevem este fenómeno, o caudal médio galgado e o volume de galgamento.

### 2.2.3. Modelos

#### Modelos Empíricos

Os modelos empíricos são amplamente utilizados, porque são de fácil aplicação. Estes modelos utilizam uma simplificação do sistema costeiro, tanto das condições de fronteira como dos forçamentos, diminuindo assim o número de variáveis a utilizar e limitando os parâmetros de resposta ( $q$ ,  $V$ ). Partem de medições de campo e/ou laboratoriais, em condições controladas, para obter uma fórmula empírica que represente o resultado físico, o que limita o universo de aplicabilidade. Requerem, porém, ponderação cuidada da escolha da fórmula a aplicar em cada situação, para garantir que haja uma semelhança de condições admissível, que permita a replicabilidade da fórmula no caso em estudo (EurOtop, 2007).

Apresenta-se, abaixo, um quadro resumo com alguns estudos relevantes, mencionando as contribuições mais interessantes para a matéria em causa (Tabela 2.2).

Tabela 2.2. Quadro resumo - Modelos empíricos de processos de galgamento

Autor(es)	Contribuições	
Battjes (1974)	Dedução de expressão para o cálculo de volume galgado em taludes suaves, atuado por ondas regulares e ondas individuais num grupo de ondas.	
Goda (1975) <sup>1</sup>	Galgamento costeiro devido a ondas não lineares utilizando o método de diagramas. Utiliza os parâmetros das ondas ao largo (Altomare <i>et al.</i> , 2016).	
Owen (1980 e 1982) <sup>1</sup>	Determinação de fórmula(s) empírica(s) para o cálculo do galgamento de estruturas de defesa costeira	Taludes lisos impermeáveis, rugosos, simples e com berma (CEM, 2002).
Bradbury & Allsop (1988) <sup>1</sup>		Enrocamento colocado em taludes impermeáveis e com muro-cortina (CEM, 2002).
Aminti & Franco (1988) <sup>1</sup>		Duas camadas de enrocamento, cubos e tetrápodes, colocados em taludes semi-impermeáveis com muro-cortina (CEM, 2002).
Ahrens & Heimbaugh (1988) <sup>1</sup>		Diversos tipos de paredes/revestimentos (CEM, 2002).
Perdersen & Burcharth (1992) <sup>1</sup>		Enrocamento colocado em taludes semi-impermeáveis com muro-cortina (CEM, 2002).
van der Meer & Janssen (1995) <sup>1</sup>		Taludes lisos impermeáveis, rugosos, simples e com berma (CEM, 2002). Emprega os parâmetros das ondas no pé da estrutura (Altomare <i>et al.</i> , 2016).
Franco <i>et al.</i> (1994) <sup>1</sup>		Quebra-mares verticais com ou sem frente perfurada (CEM, 2002). Emprega os parâmetros das ondas no pé da estrutura (Altomare <i>et al.</i> , 2016).
Van Gent (1999) <sup>1</sup>	Estudo dos efeitos da parametrização das ondas no pé da estrutura no cálculo do <i>run-up</i> , que influencia o galgamento de estruturas de defesa costeira em condições de águas muito pouco profundas (Altomare <i>et al.</i> , 2016).	
Hedges & Reis (2004) <sup>1</sup>	Análise da parametrização das condições fronteira das ondas, da utilização destes parâmetros das ondas no pé da estrutura, ou em águas profundas; os parâmetros no pé da estrutura, apesar de mais difíceis de determinar, incluem todas as modificações da onda até atingir a costa (Altomare <i>et al.</i> , 2016).	
EurOtop (2007)	Determinação de fórmula(s) empírica(s) para o cálculo do galgamento de estruturas de defesa costeira	Diques, estruturas frontais aderentes de enrocamento e verticais, quebra-mares com mantos resistentes. Emprega os parâmetros das ondas no pé da estrutura.
Goda (2009) <sup>1</sup>		Taludes suaves e impermeáveis. Emprega os parâmetros das ondas no pé da estrutura (Altomare <i>et al.</i> , 2016).
Mase <i>et al.</i> (2013)		Reformulação do “declive imaginário”, ponderado com a área do perfil do talude. Fórmula para o galgamento e <i>run-up</i> para estruturas aderentes construídas em terra ou em águas pouco profundas. Utiliza os parâmetros das ondas ao largo.
van der Meer & Bruce (2014)		Revisão das fórmulas contidas no manual EurOtop (2007), e apresentação de um ‘diagrama de decisão’ para estruturas verticais e compósitas. Emprega os parâmetros das ondas no pé da estrutura.
Van Doorslaer <i>et al.</i> (2015)		Proposta de modificação do coroamento da estrutura aderente para reduzir o galgamento, através da adaptação da fórmula do EurOtop (2007).
Altomare <i>et al.</i> (2016)		Demonstra a influência da praia submersa com declives muito baixos, e águas pouco profundas ou mesmo com o pé da estrutura emerso. Introdução do conceito de “talude equivalente” para uma praia submersa muito suave.
EurOtop (2016)		Segunda edição do manual EurOtop (2007), com atualização e melhoramento das fórmulas de previsão do caudal galgado, face a novos desenvolvimentos do estado da arte.

1 – As referências bibliográficas encontram-se na coluna de contribuições.

## PC-Overtopping

Este é um modelo computacional, desenhado inicialmente para diques, aquando da publicação do *Technical TAW Report “Wave run-up overtopping at dikes”* (EurOtop, 2007). Este modelo pode ser utilizado em quase todas as estruturas em talude, mas não em estruturas verticais, as quais podem ser modeladas por seções distintas ao longo do perfil (Figura 2.14), permitindo parametrizar a inclinação (diferente de 90°), a permeabilidade e rugosidade (EurOtop, 2007). Aquando da revisão do EurOtop este modelo não foi atualizado, permanecendo na versão EurOtop (2016) a formulação preconizada no trabalho de 2007.

Os dados de entrada correspondem a parâmetros descritivos do forçamento, e descritivos da estrutura, através do perfil e do material que o constitui.

Os *outputs* do PC-Overtopping são:

- Cota de *Run-up* excedido por 2% das ondas incidentes,  $R_{u,2\%}$
- Caudal médio galgado,  $q$
- Percentagem de ondas que galgam
- Volume máximo de galgamento,  $V_{máx}$
- Alturas do coroamento da estrutura para diferentes níveis de  $q$

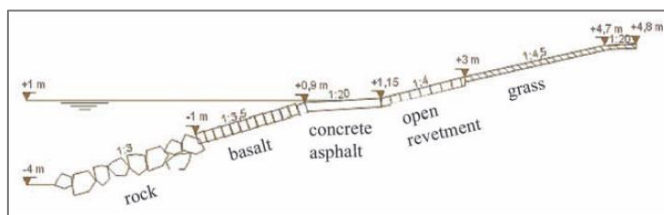


Figura 2.14. Exemplo do perfil de um dique (EurOtop, 2007)

## CLASH database

Esta base de dados resulta do Projeto Europeu CLASH, que reuniu mais de 10.000 testes de galgamento, utilizando 31 parâmetros hidráulicos e estruturais. Esta base de dados pode ser utilizada por comparação entre o caso em estudo e os contidos na base de dados, podendo haver já resultados para uma ou mais situações similares (EurOtop, 2007). Estes dados também têm sido utilizados na formulação de modelos empíricos, de redes neurais, ou para validar vários tipos de modelos.

## Redes Neurais

As redes neurais artificiais podem ser classificadas como um tipo de modelo matemático e são utilizadas, por exemplo, na classificação e reconhecimento de padrões. Simulam a organização do cérebro humano e, atualmente «constituem uma teoria para o estudo de fenómenos complexos» (Kovács, 2006).

As redes neurais estão organizadas por camadas, sendo a primeira camada composta pelos dados de entrada e a última construída com os resultados, existindo no meio camadas invisíveis. Dentro de cada camada encontram-se os ‘neurons’, que são os elementos de processamento dos dados (Figura 2.15). O projeto e desenvolvimento de redes neurais é muito complexo, mas resulta numa ferramenta de fácil utilização (EurOtop, 2007).

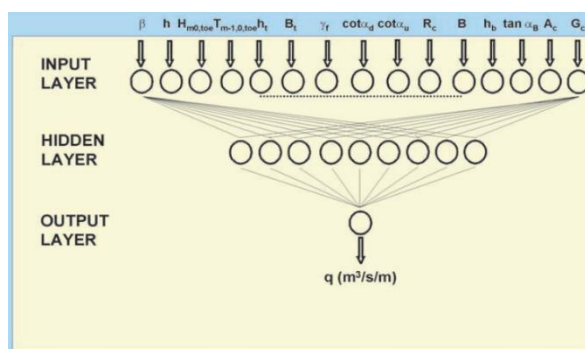


Figura 2.15. Configuração de uma rede neuronal para aplicação em estudos de galgamento costeiro (EurOtop, 2007)

No caso do estudo de galgamentos costeiros, como foi dito, os modelos empíricos só abrangem um número restrito de casos limitando a validade da extrapolação, daí as redes neurais serem uma importante ferramenta.

O projeto europeu CLASH foi realizado com o intuito criar um modelo baseado em redes neurais, *CLASH neural network tool*, contendo 15 parâmetros de entrada (3 hidráulicos e 12 da estrutura) resultando num único parâmetro de saída, o caudal médio galgado, modelado com a arquitetura representada na Figura 2.15.

Com base neste projeto, foi criada uma ferramenta neuronal NN\_Overtopping 2 (Coeveld *et al.*, 2005), e posteriormente a ferramenta EurOtop ANN (EurOtop, 2016). Ambas partem da base de dados CLASH, mas, na segunda, a base de dados foi ampliada (EurOtop, 2016). Outra diferença entre elas está nos resultados de saída. Na versão EurOtop ANN, para além do caudal médio galgado, também se podem obter o coeficiente médio de reflexão das ondas incidentes,  $K_r$ , e o coeficiente de transmissão,  $K_t$ . A gama de configurações do perfil das estruturas, em ambas as ferramentas neuronais, é bastante ampla, como se pode ver na Figura 2.16.

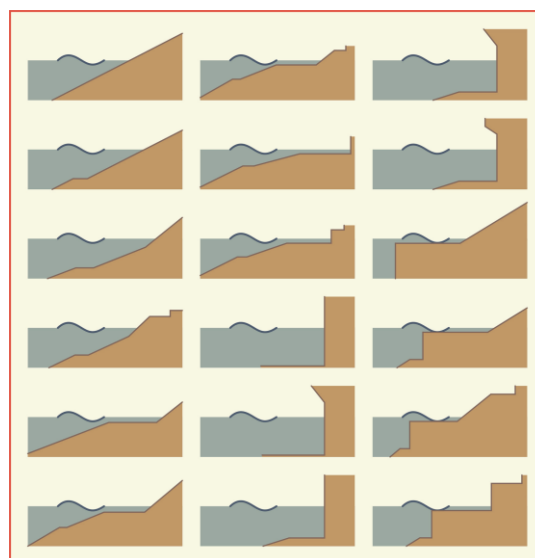


Figura 2.16. Esquema geral dos possíveis perfis em redes neuronais (EurOtop, 2016)

## Modelos Numéricos

Os modelos numéricos são normalmente usados quando não existe similitude aplicável às ferramentas atrás descritas. O campo de aplicação dos modelos numéricos é muito restrito, porque a tecnologia computacional ainda não permite, de forma económica, o desenvolvimento de modelos capazes de simular um espetro significativo de casos (EurOtop, 2007)

Até ao momento, foram desenvolvidos alguns modelos, tendo por base diferentes teorias de propagação da onda, de que se apresentam exemplos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Quadro resumo - Modelos numéricos

Tipos de modelos		Modelos <sup>(1)</sup>	Fontes
NLSW ( <i>nonlinear shallow water</i> ), teoria da onda em condições de água pouco profunda		Van Gent (1994); Dodd (1998); Hu (2000); Clarke <i>et al.</i> (2004); Hu & Meyer (2005)	(Reis & Neves, 2010)
		RBREAK; ODIFLOCS; AMAZON; ANEMONE; Tuan & Oumeraci (2010) Modelos do tipo Boussinesq: Stansby (2003); Lynett <i>et al.</i> (2010); McCabe et al. (2013); Tonelli and Petti (2013)	(EurOtop, 2016)
		SWASH	(Zijlema <i>et al.</i> , 2011)
Equações de Navier-Stokes	VOF ( <i>volume of fluid</i> ), Euleriana	Lin & Liu (1998); Losada <i>et al.</i> (2008)	(Reis & Neves, 2010)
		NASA-VOF2D/RIPPLE Modelos NS SKYLLA; COBRAS; VOFbreak <sup>2</sup> ; IH-2VOF; IH-3VOF; ComFLOW; LVOF; OpenFOAM CFD; FLOW-3D; Modelos VARANS IHFOAM; waves2Foam	(EurOtop, 2016)
	SPH ( <i>smoothed particle hydrodynamics</i> ), Lagrangeana	Dalrymple & Rogers (2006); Didier & Neves (2009)	(Reis & Neves, 2010)
		Narayanaswamy, et al., (2010); Shao (2010); Altomare et al. (2016);	(EurOtop, 2016)
SC (surface capturing)		Ingram <i>et al.</i> (2002 e 2004)	(Reis & Neves, 2010)

(1) Não consta deste trabalho a referência bibliográfica de cada modelo, nem as designações dos acrónimos aqui apresentados; para mais informações, poderá consultar as fontes indicadas na coluna "Fontes", e consultar as respetivas bibliografias.



## Modelação física

Dadas as dificuldades técnicas em modelar numericamente o galgamento e correspondente inundação, devido à complexidade do movimento dos fluidos e à diversidade e número de parâmetros necessários para simular o forçamento e representar as condições de fronteira, é usual proceder-se à modelação física recorrendo a canais de ondas (2D) ou tanques de ondas (3D). No entanto, a modelação física é um processo dispendioso, pois requer infraestruturas, tempo, recursos materiais e humanos, estes últimos com elevada experiência (Reis & Neves, 2010). A modelação física simula em modelo reduzido o caso de estudo. Devido ao grande número de parâmetros envolvidos e à complexidade da dinâmica de fluidos, a modelação física é considerada o método mais fiável no estudo do galgamento (Reis & Neves, 2010), sendo também muito utilizada para calibrar e validar outros métodos de cálculo (EurOtop, 2007).

Os modelos físicos devem ser capazes de reproduzir os movimentos reais dos fluidos, garantindo que haja semelhança de forças. Os modelos reduzidos sofrem efeitos de escala, pela impossibilidade de reproduzir a correta relação entre as várias variáveis (Frostick, McLelland, & Mercer, 2011), sendo as mais relevantes para o estudo do galgamento as que determinam a força de gravidade, o atrito viscoso e a tensão superficial, para garantir a similitude entre o modelo e a realidade.

Segundo a literatura (Frostick *et al.*, 2011, EurOtop, 2016), é recomendado que sejam aplicadas: a lei de escala de Froude, no caso de a força de gravidade ser o fator dominante,  $N_{Fi} = N_{Fg}$ , em que o número de Froude,  $Fr$ , no modelo e no caso de estudo deve ser o mesmo,  $Fr_m = Fr_n$ , onde  $Fr = v / \sqrt{g \cdot h}$ ; a lei de semelhança de Reynolds, quando as forças devidas ao atrito viscoso são dominantes,  $N_{Fi} = N_{F\mu}$ , em que o número de Reynolds,  $Re$ , no modelo e no caso de estudo deve ser o mesmo,  $Re_m = Re_n$ , onde  $Re = \rho_w \cdot v \cdot l / \mu$ ; e a lei de semelhança de Weber, quando a força dominante é a tensão superficial,  $N_{Fi} = N_{Fs}$ , com o número de Weber,  $We$ , igual no modelo e no caso de estudo,  $We_m = We_n$ , onde  $We = v \cdot h \cdot \rho_w / \sigma_w$ .

## **Principais parâmetros descritores, $q$ e $V$**

### Caudal Médio Galgado, $q$

O caudal médio galgado,  $q$ , é considerado o principal parâmetro de resposta do galgamento (EurOtop, 2016), e representa o caudal médio que ultrapassa o coroamento da estrutura (natural ou artificial) por metro linear do coroamento, expresso em  $m^3 s^{-1} m^{-1}$ .

A vantagem de utilizar este parâmetro prende-se com o facto de ser de fácil obtenção através de ensaios laboratoriais, por exemplo, com recurso a canal de ondas, e de se relacionar direta ou indiretamente com os restantes parâmetros que decorrem do processo de galgamento. No entanto, o fenómeno do galgamento não é linear, pelo que o valor médio não traduz integralmente, nem de forma exata, o processo; essa descrição deveria ser obtida através da análise de caudal galgado onda-a-onda. Esta observação é de fácil perceção se se pensar no efeito do galgamento de uma grande onda, que debita um elevado caudal em poucos segundos, face a um grupo de ondas medianas que produziriam o mesmo caudal, num intervalo de tempo superior.

Como já foi referido, as formulações empíricas têm por base condições muito específicas de forçamento e dependem também das características das estruturas que estão sujeitas ao fenómeno. No entanto a principal fórmula empírica utilizada para o cálculo do galgamento (EurOtop, 2016), é:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = a e^{(-bR_c/H_{m0})^c}, \text{ para } R_c \geq 0 \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Esta fórmula sofreu alterações entre o descrito no EurOtop (2007) e a revisão de 2016, tendo sido alterado o coeficiente  $c$  que passou de 1 para 1.3.

Na fórmula de EurOtop (2007) esta relação adimensional exponencial, entre o galgamento,  $q/\sqrt{gH_{m0}^3}$ , e a altura relativa do coroamento,  $R_c/H_{m0}$ , quando projetada num gráfico semi-logarítmico devolve uma linha reta, facilitando assim a comparação entre estruturas diferentes e formulações distintas (EurOtop, 2016). Na nova fórmula, a linha deixa de ser uma reta passando a ter uma ligeira curvatura, com maior diferença quando  $R_c/H_{m0} < 0.5$  (EurOtop, 2016).

Segundo o método empírico de van der Meer & Janssen (1995), os galgamentos distinguem-se conforme o tipo de rebentação (CEM, 2002), da seguinte forma:

Para  $\xi_{op} < 2$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} \sqrt{\frac{\delta_{op}}{\tan\theta}} = a e^{(-bR^*)} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

onde,

$$R^* = \frac{R_c}{H_s} \sqrt{\frac{\delta_{op}}{\tan\theta}} \frac{1}{\gamma} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

E para  $\xi_{op} > 2$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = a e^{(-bR^*)} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

onde,

$$R^* = \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

As Equações (Eq. 2.6) e (Eq. 2.7) mostram a influência do ângulo do talude e da declividade da onda no galgamento quando há rebentação ( $\xi_{op} < \xi_{crit}$ ).

#### Volume de Galgamento, $V$

O volume de galgamento,  $V$ , é o volume de água de uma onda que ultrapassa o coroamento da estrutura e é medido em  $m^3$  por metro linear do coroamento da estrutura, como já foi referido. O cálculo deste parâmetro, segundo EurOtop (2016), recorre ao caudal médio,  $q$ ; à duração da tempestade, e ao número de ondas de galgamento nesse período,  $N_{ow}$ .

O volume máximo,  $V_{m\acute{a}x}$ , é muito importante para perceber a intensidade do fenómeno. Por exemplo, em condições de tempestade, o valor do caudal médio galgado durante determinado intervalo de tempo, causado por muitas ondas de menores alturas, pode ser igual ao volume de uma única onda de maior altura. A função de distribuição de probabilidades de volumes de galgamento, segue uma distribuição de Weibull (EurOtop, 2016), e pode ser expressa através da seguinte equação,

$$P_V = P(V_i \geq V) = e^{\left[-\left(\frac{V}{a}\right)^b\right]} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

onde,  $P_V$ , representa a probabilidade de excedência do volume de galgamento por onda,  $a$  é um parâmetro de escala e  $b$  um parâmetro de forma da distribuição. Para o cálculo do volume máximo durante um evento por apenas uma onda, recorre-se à estimativa do número de ondas de galgamento, do seguinte modo (EurOtop, 2016),

$$V_{\max} = a[\ln(N_{ow})]^{1/b} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

#### 2.2.4. Modelos de Cálculo do Galgamento Utilizados

Neste trabalho, o galgamento foi descrito através do caudal médio galgado. Para tal, recorreu-se a formulações empíricas e a uma ferramenta neuronal. Neste subcapítulo faz-se uma descrição teórica mais detalhada de cada modelo de cálculo utilizado.

##### Método empírico EurOtop (2016)

O manual EurOtop (2016) fornece várias formulações conforme o tipo de estrutura, separando-as por capítulos. Assim, também aqui serão distinguidas da mesma forma. Neste trabalho, a utilização deste método baseou-se nas formulações de valores médios para o cálculo da altura de *run-up* (2%) e para o caudal médio galgado, e não a abordagem de valores de projeto, porque a finalidade é avaliar a fiabilidade das estruturas existentes.

EurOtop (2016), capítulo 5 – Diques costeiros e estruturas de aterro de proteção aderentes (*Coastal dikes and embankment seawalls*)

Este capítulo do EurOtop (2016) pretende responder a várias situações consoante a relação entre as características geométricas do perfil e os forçamentos, atribuindo formulações divergentes para cada situação, tal como se mostra na Figura 2.17 através de um diagrama de decisão conforme as características da estrutura de defesa costeira em análise.

No presente estudo, os fatores de influência considerados para este método foram a rugosidade,  $\gamma_f$ , a obliquidade das ondas,  $\gamma_\beta$  e o efeito de muro de tempestade,  $\gamma_v$ , tendo sido garantido que a globalidade dos fatores de influência nunca é inferior a 0.4.

O caudal médio galgado é obtido através da seguinte relação,

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0.023}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp \left[ - \left( 2.7 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right)^{1.3} \right] \quad (\text{Eq. 2.11})$$

com um máximo de

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.09 \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp \left[ - \left( 1.5 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right] \quad (\text{Eq. 2.12})$$



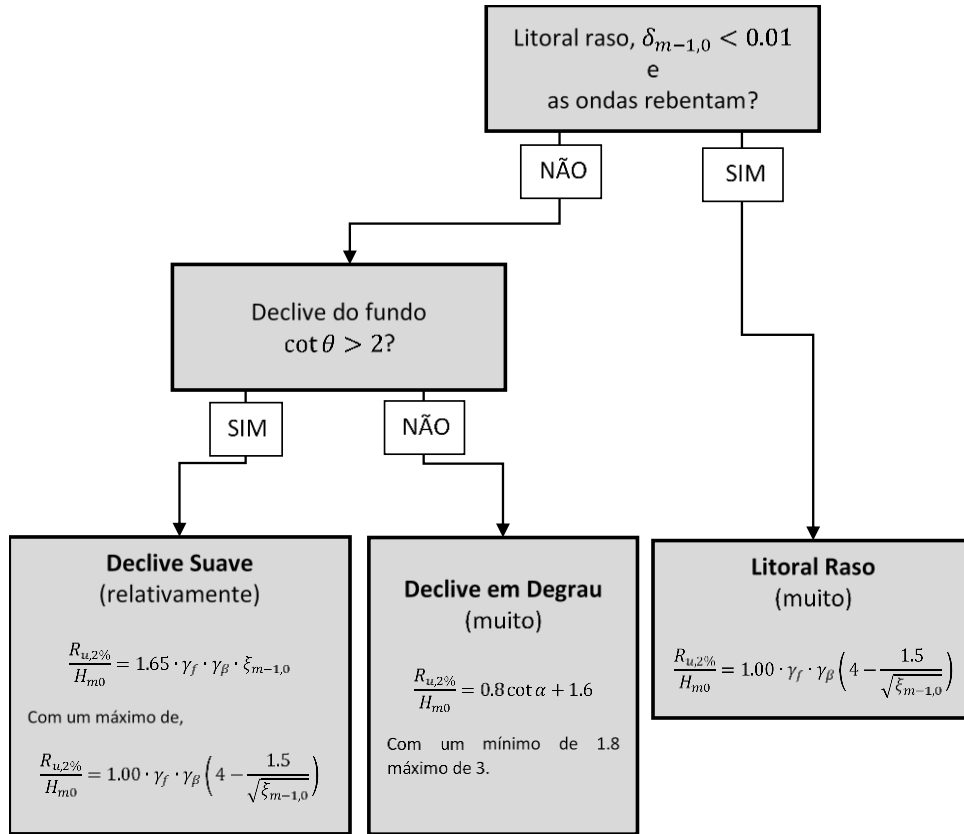


Figura 2.17. Esquema de decisão (adaptado e traduzido de EurOtop, 2016)

EurOtop (2016), capítulo 6 – Estruturas com manto resistente (*Armoured rubble slopes and mounds*)

Este capítulo aborda estruturas que se caracterizam por perfis com um manto resistente permeável e/ou poroso de rocha (ou blocos de betão) tanto para estruturas transversais como longitudinais aderentes, com declives entre 1:2 e 1:4/3, onde foram considerados como fatores de influência a rugosidade,  $\gamma_f$  e a obliquidade das ondas,  $\gamma_\beta$ .

Para o cálculo da altura de *run-up*,  $R_{u,2\%}$ , são considerados a altura da onda,  $H_{m0}$ , e o Número de *Iribarren*, obtido a partir do período dos momentos de ordem espectral -1 e 0,  $\xi_{m-1,0}$ , do seguinte modo:

$$\frac{R_{u,2\%}}{H_{m0}} = 1.65 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0} \quad (Eq. 2.13)$$

com um máximo de,

$$\frac{R_{u,2\%}}{H_{m0}} = 1.00 \cdot \gamma_{f,surging} \cdot \gamma_\beta \left( 4 - \frac{1.5}{\sqrt{\xi_{m-1,0}}} \right) \quad (Eq. 2.14)$$

considerando os valores máximos de 3 para estruturas com núcleo impermeável e 2 para estruturas com núcleo permeável, e onde,  $\gamma_{f,surging} = \gamma_f + (\xi_{m-1,0} - 1.8) \cdot (1 - \gamma_f)/8.2$ , variando linearmente entre  $1.8 \leq \xi_{m-1,0} \leq 10$  até ao valor 1.

Já no caso do cálculo do caudal médio galgado,  $q$ , é obtido pela seguinte relação, para declives entre 1:2 e 1:4/3,

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.09 \cdot \exp \left[ - \left( 1.5 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_{f,mod} \cdot \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right] \quad (Eq. 2.15)$$

onde  $\gamma_{f,mod} = \gamma_f + (\xi_{m-1,0} - 5) \cdot (1 - \gamma_f)/5$ , para valores de  $\xi_{m-1,0} > 5$ , ou seja, o efeito de ondas de maior período vai fazer-se sentir através deste índice.

## Ferramenta Neuronal

Neste estudo, optou-se por utilizar a ferramenta neuronal de 2007 (NN\_Overtopping 2) (EurOtop, 2007) em detrimento da ferramenta mais atualizada, descrita no manual EurOtop (2016). Esta opção foi tomada devido à disponibilidade dos dados de entrada para cada ferramenta neuronal. Ambas as ferramentas são parametrizadas através de 15 descritores, entre eles a rugosidade do material, apresentando diferenças na forma de o considerar: enquanto na versão inicial este é descrito apenas pelo índice de rugosidade/permeabilidade,  $\gamma_f$ , na versão de 2016, além de  $\gamma_f$ , também é necessário recorrer ao diâmetro nominal do material constituinte do manto resistente. No entanto, este dado não se encontra disponível para o caso de estudo em análise, pelo que se recorreu à ferramenta neuronal mais simples de 2007. De seguida, faz-se uma breve descrição da ferramenta NN\_Overtopping 2.

### Ferramenta Neuronal, NN Overtopping 2

Os dados de entrada desta rede são compostos por 3 parâmetros hidráulicos:

$H_{m0\ toe}$	Altura significativa espectral no pé da estrutura, m
$T_{m-1,0\ toe}$	Período espectral no pé da estrutura, s
$\beta$	Ângulo de ataque das ondas em relação à normal da estrutura, graus (°)

e 12 parâmetros da estrutura:

$h$	Altura de água em frente à estrutura, m
$h_t$	Altura de água sobre o pé do talude da estrutura, m
$B_t$	Largura do pé do talude da estrutura, m
$\gamma_f$	Coefficiente de rugosidade/permeabilidade
$\cot(\alpha_d)$	Declive da estrutura abaixo da berma do talude
$\cot(\alpha_u)$	Declive da estrutura acima da berma do talude
$B$	Largura da berma do talude, m
$h_b$	Altura de água sobre a berma, m
$\tan(\alpha_B)$	Declive da berma do talude da estrutura
$R_c$	Bordo livre do coroamento da estrutura (parte impermeável), m
$A_c$	Bordo livre do manto resistente da estrutura (parte permeável), m
$G_c$	Largura da berma do coroamento da estrutura, m

Neste modelo o coeficiente de rugosidade,  $\gamma_f$ , corresponde a um valor médio, aplicado em todo o perfil.

A Figura 2.18 representa, esquematicamente, os 15 parâmetros acima descritos.

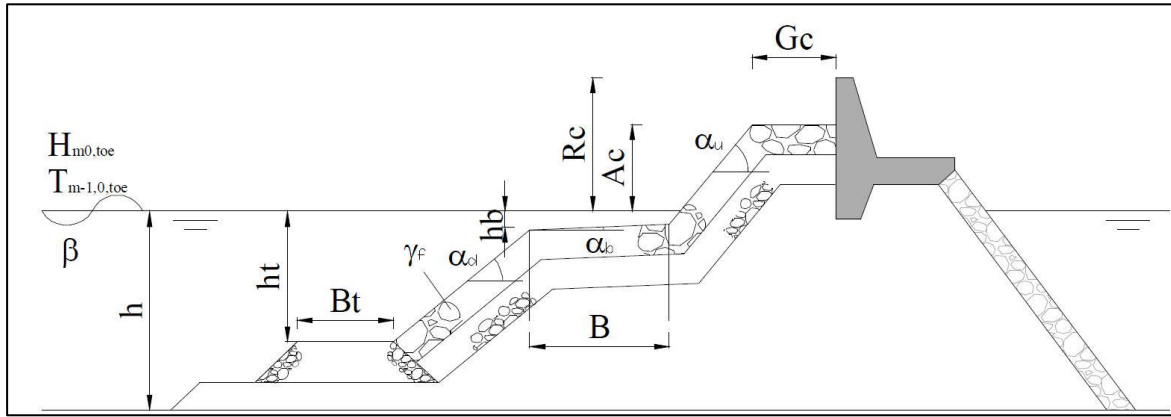


Figura 2.18. Parâmetros utilizados no modelo NN\_Overtopping 2 (Coeveld *et al.*, 2005)

Para cada conjunto de dados de entrada, esta ferramenta devolve o caudal médio galgado,  $q$ , e os quantis de várias ordens pré-definidas,  $q_{2.5\%}$ ,  $q_{5\%}$ ,  $q_{25\%}$ ,  $q_{50\%}$ ,  $q_{75\%}$ ,  $q_{95\%}$  e  $q_{97.5\%}$  (Coeveld *et al.*, 2005).

### Método de Mase *et al.* (2013)

Mase *et al.* (2013) propõem um modelo de previsão de *run-up* e de caudal médio galgado em estruturas de defesa costeira construídas em terra ou num litoral raso, recorrendo às características das ondas não no pé da estrutura, como a maioria das outras formulações, mas a uma profundidade equivalente e usando um perfil imaginário da estrutura; estas simplificações são essenciais para facilitar o estudo de estruturas emersas (Mase *et al.*, 2013).

O perfil imaginário é obtido segundo o esquema abaixo representado (Figura 2.19) com base na área compreendida entre a profundidade de rebentação e a altura atingida pelo *run-up*.

A profundidade de rebentação,  $d_b$ , é obtida pelo modelo de transformação das ondas de Mase & Kirby (1993) para ondas irregulares (Mase *et al.*, 2013). Este modelo reporta a perfis com fundos de declive constante de 1:10, 1:20, 1:30 e 1:100, providenciando um diagrama adimensional de profundidade de rebentação,  $d_b/H_o$ , versus a declividade da onda ao largo,  $H_o/L_o$ , para os diferentes declives (Figura 2.20).

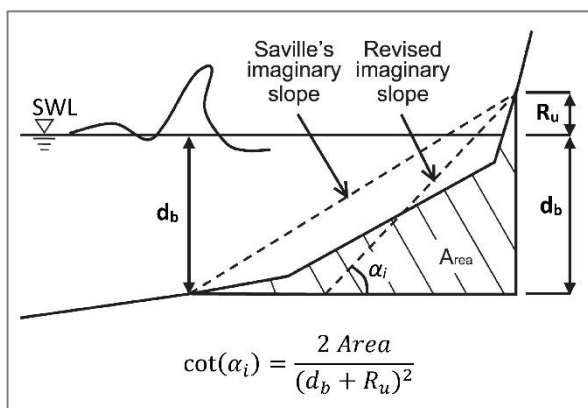


Figura 2.19. Perfil imaginário segundo Mase *et al.* (2013)

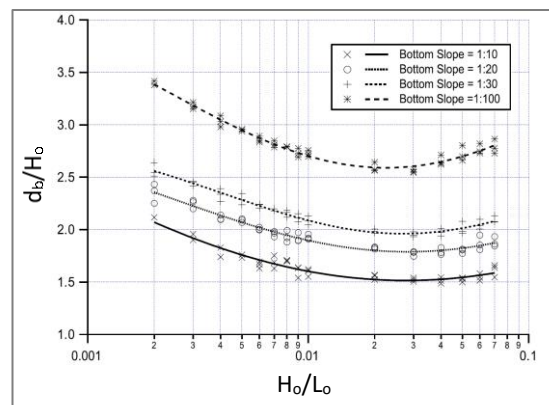


Figura 2.20. Diagrama adimensional de profundidade de rebentação versus a declividade da onda ao largo (Mase *et al.*, 2013)

Mase *et al.* (2013) apresentam três formulações para o cálculo de  $R_{u,2\%}$ ,  $R_{u,1/10}$ ,  $R_{u,1/3}$ , respetivamente, a saber,

$$R_{u,2\%}/H_o = 2.99 - 2.73 \exp\left(-0.57 \cdot \tan \alpha_i / \sqrt{H_o/L_o}\right) \quad (\text{Eq. 2.16})$$

$$R_{u,1/10}/H_o = 2.72 - 2.56 \exp\left(-0.58 \cdot \tan \alpha_i / \sqrt{H_o/L_o}\right) \quad (\text{Eq. 2.17})$$

$$R_{u,1/3}/H_o = 2.17 - 2.18 \exp\left(-0.70 \cdot \tan \alpha_i / \sqrt{H_o/L_o}\right) \quad (\text{Eq. 2.18})$$

Sob as seguintes condições,

$$0.2 < \tan \alpha_i / \sqrt{H_o/L_o} < 4 \text{ aproximadamente}$$

$$0.009 < H_o/L_o < 0.06$$

$$-0.37 < d/H_o < 0.53$$

Neste método, o caudal médio galgado é combinado com o máximo *run-up* provável, descrito como o valor máximo, não excedido, durante uma série de registos de 100 ondas consecutivas, assumindo uma distribuição de Rayleigh. Hedges & Reis (1998) relacionaram o máximo *run-up* provável de não excedência de 37% e 99% com  $R_{u,2\%}$  e  $R_{u,1/3}$ . Para o caso da não excedência de 37%, através de

$$(R_{u,max})_{37\%,100} \approx 1.52R_{u,1/3} \approx 1.09R_{u,2\%} \quad (\text{Eq. 2.19})$$

e para o valor máximo não excedido em 99% dos casos para um registo de 100 ondas, por

$$(R_{u,max})_{99\%,100} \approx 2.15R_{u,1/3} \approx 1.54R_{u,2\%} \quad (\text{Eq. 2.20})$$

Com base nestas duas estimativas de *run-up* máximo, são propostas duas formulações para o cálculo do caudal médio galgado para estruturas de defesa costeira aderentes, construídas em terra ou em litorais rasos:

Para  $R_{u,max} = (R_{u,max})_{37\%,100}$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_o^3}} = \begin{cases} 0.018 \left(\frac{R_{u,max}}{H_o}\right)^{2/3} \left[1 - \left(\frac{R_c}{H_o}\right) / \left(\frac{R_{u,max}}{H_o}\right)\right]^{3.20}, & 0 \leq R_c < R_{u,max} \\ 0, & R_{u,max} \leq R_c \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.21})$$

Para  $R_{u,max} = (R_{u,max})_{99\%,100}$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_o^3}} = \begin{cases} 0.018 \left(\frac{R_{u,max}}{H_o}\right)^{2/3} \left[1 - \left(\frac{R_c}{H_o}\right) / \left(\frac{R_{u,max}}{H_o}\right)\right]^{6.24}, & 0 \leq R_c < R_{u,max} \\ 0, & R_{u,max} \leq R_c \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.22})$$

Este método foi aplicado no presente estudo recorrendo ao programa *Calcula\_Runup\_Galgamento\_Mase.f*. Este é um programa em FORTRAN de cálculo do *run-up* e do galgamento desenvolvido pelo LNEC, no âmbito do projeto HIDRALERTA (Fortes *et al.*, 2013).

Este programa está organizado em quatro ficheiros de entrada:

- *Alturas\_condicoeslargo.dad*, referente às condições de forçamento;
- *dados\_condicoeslargo.dad*, onde são introduzidos as condições iniciais, as condições de fronteira e o método de cálculo;
- *estrutura.dad*, contendo a discretização dos pontos notáveis do perfil; e
- *Tabela.dad* com a matriz de valores dos resultados de Mase & Kirby (1993), correspondente à Figura 2.20.

O programa devolve dois ficheiros de saída: um ficheiro onde se podem visualizar todos os resultados intermédios, *teste.dad*, e outro contendo os resultados finais, *galgamento\_R\_totais.dad*, como se esquematiza na Figura 2.21.



Figura 2.21. Esquema do programa *Calcula\_Runup\_Galgamento\_Mase.f*

A aplicação deste programa necessita de algumas considerações sobre a geometria do perfil, dado que não existe um ponto definidor do pé da estrutura. Assim, a convenção da origem do perfil,  $x = 0$  m, deve ser tal que abranja toda a zona de rebentação, para a gama de alturas de ondas a estudar, traduzida pelas diversas profundidades de rebentação,  $d_b$ .

É importante ainda notar a convenção de sinais adotada no programa segundo o eixo  $z$ ; a origem ( $z = 0$  m) é referida ao ZH, com valores positivos para baixo e negativos no sentido contrário, tal como indicado na Figura 2.22.

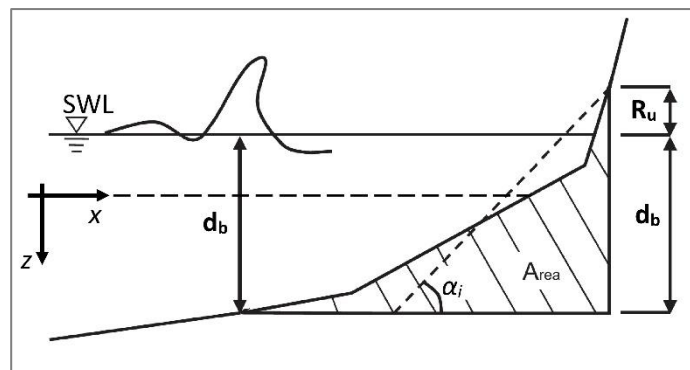


Figura 2.22. Sistema de eixos (adaptado de Mase et al., 2013)

## 2.2. AVALIAÇÃO DO RISCO DE GALGAMENTO E INUNDAÇÃO

Segundo Cunha & Dimuccio (2002) o conceito de risco, no seu sentido mais restrito, “*designa a probabilidade espacial e temporal de ocorrência de um fenómeno, neste caso um fenómeno indesejado, pelas consequências negativas de que se reveste para o Homem e para a sociedade*”.

Portanto, pode-se dizer que a Avaliação de Risco será um balanço causa/efeito através dos seguintes conceitos (Cunha, 2013), como esquematizado na Figura 2.23,

- Perigosidade (*Hazard*) – Ocorrência de evento perigoso, traduzida por probabilidade espacio-temporal de ocorrência;
- Vulnerabilidade – Consequências previsíveis sobre a sociedade, o ambiente e o território considerando a resiliência da sociedade em causa.

$$\text{Risco} = \text{Perigosidade} \times \text{Vulnerabilidade}$$

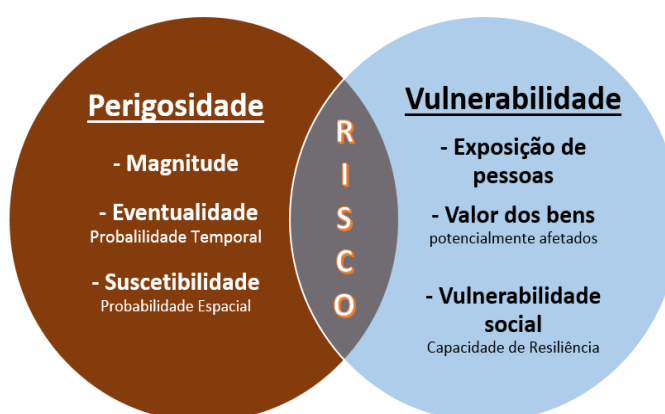


Figura 2.23. Esquema da formulação do risco

No caso de eventos estocásticos, a dificuldade de determinação do risco está associada à dificuldade de previsão do evento (*Eventualidade* e *Suscetibilidade*), como é o caso dos fenómenos atmosféricos e da agitação marítima, inerentes ao galgamento costeiro.

Na prática, estes conceitos probabilísticos podem ser determinados pela probabilidade de excedência,  $P$ , em determinado período de análise,  $T$ , num determinado local. No caso da avaliação de um projeto, normalmente, utiliza-se  $T$  como sendo o tempo de vida útil da obra. Cada evento está associado a um período de retorno,  $T_R$ , ou seja, o período no qual o evento poderá ocorrer, em média, uma vez. Estes parâmetros relacionam-se da seguinte forma:  $P = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^T$ , ou seja,  $P$  é a probabilidade de um evento ocorrer no período em análise (Carmo, 2016).

O manual EurOtop (2007), aconselha períodos de retorno conforme a vida útil do projeto (Tabela 2.4).

Tabela 2.4. Níveis de proteção por tipo de projeto (EurOtop, 2007)

Tipo de Projeto	Vida útil do Projeto (anos)	Nível de Proteção <sup>(1)</sup> (anos)
Medidas temporárias ou de período curto	1-20	5-50
Proteções e defesas costeiras (em geral)	30-70	50-100
Proteção à inundação de grandes áreas em risco	50-100	100-10 000
Estrutura especial, valor elevado	200	Mais de 10 000
Centrais nucleares, etc.	--	10 000

<sup>(1)</sup>Nota: Probabilidade total para período de retorno

Para a análise das vulnerabilidades devidas a eventos de galgamento e consequente inundação, existem várias escalas que, através de valores de caudal médio galgado,  $q$ , ou volume máximo de galgamento,  $V_{máx}$ , identificam as possíveis consequências/perigos. Como já foi referido anteriormente, é mais fácil estimar o valor médio  $q$  do que  $V_{máx}$ , pelo que em CEM (2002) por exemplo, apenas se estabelecem recomendações dos limites de segurança para valores de  $q$ ; já EurOtop (2007) também indica valores-limite de  $V_{máx}$  para classificar a vulnerabilidade.

Para além destes fatores, outros existem que caracterizam os galgamentos, tais como a velocidade do escoamento ( $m.s^{-1}$ ) e a pressão (kPa) induzida pelo escoamento associado aos fenómenos de galgamento. Por exemplo, alguns estudos sugerem velocidades horizontais de galgamento máximas toleráveis para transeuntes de  $2.5 m.s^{-1}$  e veículos de  $5.0 m.s^{-1}$  (EurOtop, 2007).

O manual CEM (2002), sendo dedicado a estruturas artificiais de proteção costeira, classifica a segurança e estabelece limites face à ocorrência de galgamentos em termos de danos nessas estruturas, limitando a abordagem aos limites tolerados por pedestres, veículos e edifícios (Tabela 2.5).

Tabela 2.5. Valores críticos de galgamento (traduzido e adaptado de CEM (2002), capítulo VI)

$q$ ( $m^3/s/m$ )	Veículos	Peões	Edifícios	$q$ ( $l/s/m$ )
$10^0$				1000
$10^{-1}$				200
$10^{-2}$	Inseguro a qualquer velocidade	Muito Perigoso		50
				20
				10
$10^{-3}$			Danos estruturais	
				1
$10^{-4}$	Inseguro estacionar	Perigoso sobre estruturas de proteção		0.1
$10^{-5}$	Inseguro para velocidades elevadas	Desconfortável (não perigoso)	Pequenos danos	0.02
				0.01
				0.005
$10^{-6}$		Molhado mas não desconfortável		0.001
	Seguro		Ausência de Danos	
$10^{-7}$				0.0001

Já o manual EurOtop (2016) refere uma abordagem geral aos danos em estruturas costeiras, dedicando-se mais às possíveis consequências em pessoas, veículos e danos em propriedades / infraestruturas / equipamentos, localizados na zona protegida pela estrutura galgada (Tabela 2.6). É de realçar que o manual EurOtop (2016) admite que a severidade dos eventos não depende apenas da magnitude do galgamento, mas também da altura da onda que o origina (Tabela 2.6).

Tabela 2.6. Valores críticos de galgamento (traduzido de EurOtop, 2016)

Tipo de Perigo e condições	Caudal médio, $q$	
	$m^3.s^{-1}.m^{-1}$	$L.s^{-1}.m^{-1}$
Edifícios; $H_{m0} = 1 - 3$ m	$\leq 10^{-3}$	$\leq 1$
Equipamentos a 5 – 10 m	$\leq 10^{-3}$	$\leq 1$
Pessoas no coroamento com possibilidade de forte galgamento, principalmente estruturas verticais.	Interdito para qualquer previsão de galgamento	
Pessoas sobre estruturas de proteção, com clara visão do mar.		
$H_{m0} = 3$ m	$3 \times 10^{-4}$	0.3
$H_{m0} = 2$ m	$10^{-3}$	1
$H_{m0} = 1$ m	$(1 - 2) \times 10^{-2}$	10 - 20
$H_{m0} < 0.5$ m	Sem limite	
Veículos automóveis sobre estruturas de proteção, ou em estradas perto do coroamento das estruturas.		
$H_{m0} = 3$ m	$< 5 \times 10^{-3}$	$< 5$
$H_{m0} = 2$ m	$(1 - 2) \times 10^{-2}$	10 - 20
$H_{m0} = 1$ m	$< 7.5 \times 10^{-2}$	$< 75$
Autoestradas e vias equiparadas, para velocidades elevadas.	Fechar antes de haver galgamento do tipo spray	



### 3. CASO DE ESTUDO: TROÇO LITORAL CASCAIS - CARCAVELOS

O troço litoral entre Cascais e Carcavelos, apesar de beneficiar de condições de abrigo face às condições mais frequentes de agitação marítima na costa oeste portuguesa, alberga em si características que o tornam vulnerável ao impacto dos fenómenos de galgamento costeiro sobre pessoas e bens. O troço costeiro em questão foi sofrendo, ao longo dos anos, modificações antropogénicas que levaram à sua ocupação e, principalmente, fixação, para aproveitamentos rodoviário, ferroviário e turístico. Assim, um grande número de áreas e infraestruturas dedicadas a atividades lúdicas e económicas, tais como o passeio marítimo, cafés e esplanadas, encontram-se em locais sujeitos a galgamento oceânico.

O temporal Hércules/Christine, ocorrido entre 3 e 7 de janeiro de 2014, é um exemplo, com registo de danos imputáveis a galgamento (Figura 3.1), que somam, neste troço, um prejuízo estimado em cerca de 300.000€ (Pinto *et al.*, 2014).



Figura 3.1. Registo fotográfico dos danos causados pelo temporal de 3 a 7 de janeiro de 2014. Praia do Tamariz (Pinto *et al.*, 2014)

Neste estudo, todas as cotas (altimétricas) e profundidades (batimétricas) estão referidas ao Zero Hidrográfico, ZH (um plano de referência convencional situado 2.08 m abaixo do nível médio do mar, NMM, de Cascais, 1938). Convencionou-se que as cotas altimétricas são positivas para cima e as batimétricas têm o mesmo sinal no sentido oposto, e ainda, que os rumos são referidos por azimutes com origem no norte.

#### 3.1. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

Com uma área de 97 km<sup>2</sup>, o concelho de Cascais (Figura 3.2) confronta com o mar ao longo de 24 km através de um litoral geomorfologicamente muito diverso (Gonçalves, 2015). A linha de costa compreende dois segmentos, um predominantemente norte-sul, desde a praia do Porto do Touro até ao Cabo Raso, e outro, desde aquele promontório até São Julião da Barra, com orientação geral WNW-ESE. O carácter litorâneo do concelho é demonstrado pelo valor elevado da razão entre o comprimento de linha de costa e a superfície do concelho (0,25, um valor 27 vezes superior à média de Portugal continental) (Taborda *et al.*, 2010).



Figura 3.2. Enquadramento geográfico do concelho de Cascais (<https://pt.wikipedia.org/wiki/Cascais>)

O troço costeiro em estudo corresponde ao segmento mais abrigado, virado a sul, compreendido entre a praia da Rainha (38°41'56"N; 9°25'6"W) e o Forte de São Julião da Barra (38°40'29"N; 9°19'36"W), com uma extensão de aproximadamente 9 km (Figura 3.3). Este troço compreende um total de 17 praias (Playocean©, 2018) (Figura 3.3) que, na sua totalidade, ocupam, aproximadamente, 1/3 daquele comprimento, correspondendo os restantes 6 km a litoral alcantilado, de arriba.

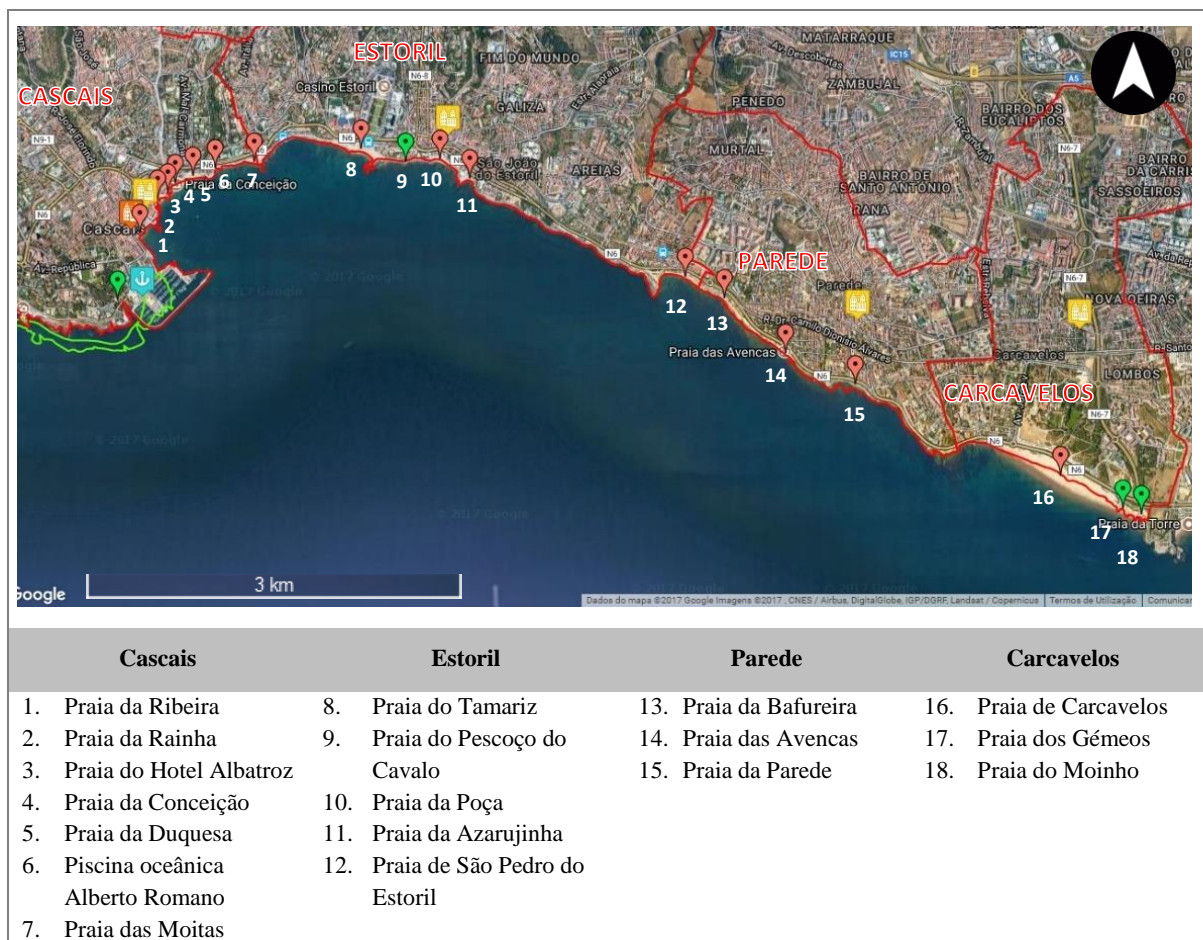


Figura 3.3. Distribuição geográfica das praias no troço em análise (Toponímia utilizada em Playocean ©, 2018)

A distribuição geográfica da população é acentuadamente assimétrica, concentrando-se na zona costeira<sup>1</sup> sul, que alberga também núcleos urbanos, industriais e comerciais relevantes (Taborda *et al.*, 2010).

A área em estudo (e os terrenos adjacentes à linha de costa) encontra-se sujeita a forte pressão antropogénica, como observado na Figura 3.4, conforme classificação do Programa *Corine Land Cover 2012* (CLC, 2012). Traduz-se maioritariamente por tecido urbano descontínuo, apresentando também áreas de tecido urbano contínuo na cidade de Cascais, algumas áreas com instalações desportivas e de lazer no Monte Estoril, e zonas verdes urbanas em Carcavelos. Esta frente costeira encontra-se maioritariamente confinada por construções, sendo flanqueada por estrada (Avenida Marginal) ou pela linha de comboio (Linha de Cascais).

<sup>1</sup> Segundo o Decreto-Lei n.º 159/2012, de 24 de julho, entende-se por «Zona costeira: a porção de território influenciada direta e indiretamente, em termos biofísicos, pelo mar, designadamente por ondas, marés, ventos, biota ou salinidade, e que, sem prejuízo das adaptações aos territórios específicos, tem, para o lado da terra, a largura de 2 km medida a partir da linha da máxima preia-mar de águas vivas equinociais e se estende, para o lado do mar, até ao limite das águas territoriais, incluindo o leito».

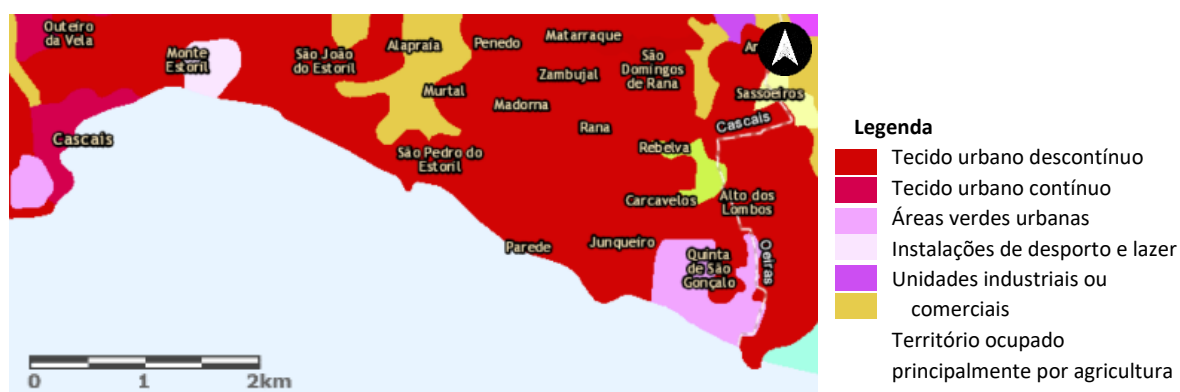


Figura 3.4. Distribuição da ocupação e uso do solo (CLC, 2012)

### 3.2. ENQUADRAMENTO SOCIOECONÓMICO

O concelho de Cascais, tal como a generalidade do país, sofreu uma mudança dos principais sectores de atividade produtiva a partir do início do séc. XX, marcada por abandono do sector primário (atividades relacionadas com a agricultura, pesca e comércio do pescado) e incremento dos sectores secundário (atividades industriais) e, principalmente, terciário (serviços) (PDM Cascais, 2014). Em 2012, o sector dos serviços encontrava-se em franco crescimento, tendo atingido 90% da atividade empresarial do concelho nesse ano (mais 8 pontos percentuais face a 2008) (Figura 3.5), (PDM Cascais, 2014).

Deste sector, pode-se destacar o turismo, associado às boas características balneares das praias do concelho e à proximidade da capital do país. Aliás, o turismo conta já com uma longa tradição no concelho enquanto estância de férias ou local de residência da nobreza e alta burguesia (Figura 3.6) com a praia de Cascais a assumir o estatuto de praia da Corte, em 1867, no reinado de D. Maria Pia (Henriques *et al.*, 2014).

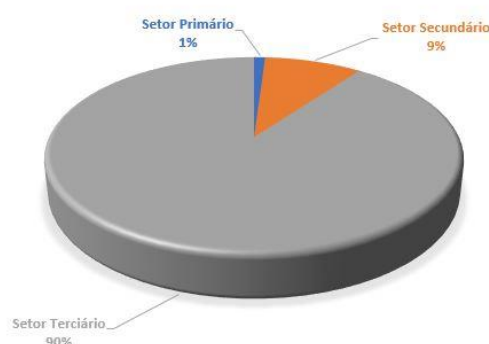


Figura 3.5. Empresas sediadas em Cascais por setor em 2012. Última atualização: 2014-03-13 (INE)

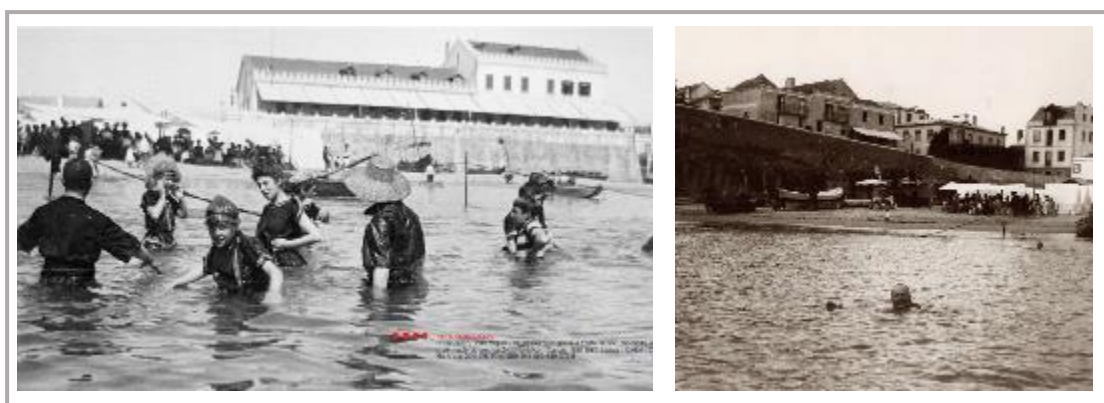


Figura 3.6. À esquerda, banhistas na praia da Ribeira, em Cascais, 1864-84. À direita, rei D. Carlos I junto à praia da Ribeira (Henriques *et al.*, 2014)

A procura de alojamento temporário para férias ou uso balnear, e para residência permanente, fez edificar toda a costa sul do concelho de Cascais e mesmo as zonas mais desabitadas sofreram um extraordinário crescimento (Henriques *et al.*, 2014).

Como referido, o turismo continua a ser uma grande alavanca económica do concelho, o que provoca aumento generalizado da procura pelas suas zonas costeiras, por razões balneares, desportivas (Taborda *et al.*, 2010) e também pelas oportunidades de emprego e melhores condições de vida proporcionadas por este sector de atividade. Desta forma, a pressão antropogénica sobre o litoral cascalense tem vindo também a aumentar, expressa por contínuo crescimento populacional e do edificado, registado nos sucessivos censos, e ilustrado na Figura 3.7.

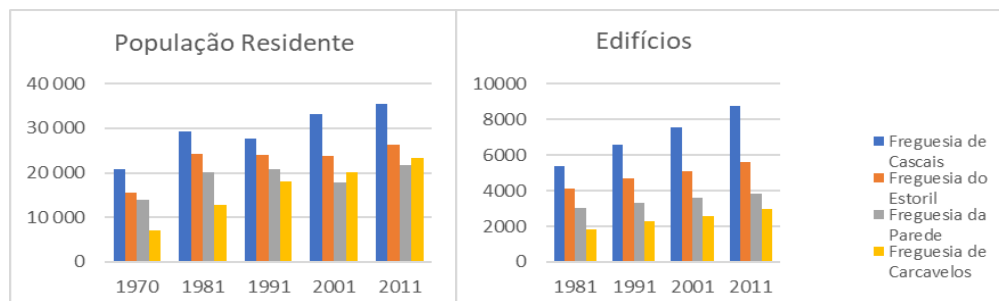


Figura 3.7. População residente total por freguesia. Censos de 1970 a 2011. Edifícios por freguesia. Censos de 1981 a 2011 (INE)

O concelho de Cascais apresenta um quadro socioeconómico tendencialmente melhor do que a média nacional no que respeita ao nível de escolaridade, poder de compra e taxa de desemprego (PORDATA, 2017). Também a gestão autárquica mostra uma taxa de endividamento abaixo dos 40% em 2015, inferior à média nacional (PORDATA, 2017).

### 3.3. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

O concelho de Cascais apresenta uma clara diferença da sua natureza geológica nas zonas norte e sul, como ilustrado na Carta Geológica de Portugal, Folha 34-C (Ramalho *et al.*, 1981). Na região sul (Figura 3.8), que compreende a faixa litoral em estudo, afloram rochas maioritariamente do Cretácico inferior, constituídas aqui por arenitos, calcários e margas do Belasiano ( $C^2_{AC}$ ) e, em menor extensão, pelos termos calcários, margosos e detríticos das “Camadas de Almargem” ( $C^1_{Ba}$ ,  $C^1_A$ ,  $C^1_{AS}$ ). Para o interior da faixa costeira e em alguns pontos da linha de costa ocorrem retalhos da cobertura miocénica, discordantes sobre o substrato carbonatado cretácico, e ainda afloramentos descontínuos de basaltos do Complexo Vulcânico de Lisboa (Sequeira & Ramalho, 2010), sob a forma de restos de escoadas e intrusões filoneanas.

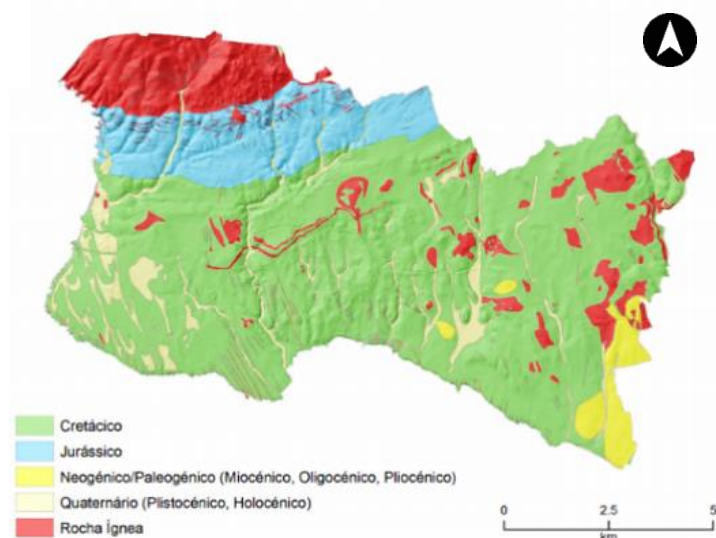


Figura 3.8. Geologia (simplificada) do concelho de Cascais (Taborda *et al.*, 2010)



A faixa costeira em estudo corresponde ao limite meridional da *Plataforma de Cascais*, uma superfície pouco acidentada que se estende para sul do maciço de Sintra. Esta superfície foi extensamente aplanada pelo mar durante o Pliocénico e Plistocénico, e desenvolve-se sobre substrato essencialmente calcário, a cotas progressivamente maiores para o interior, até 100–120 m (Taborda *et al.*, 2010).

Em termos globais, a linha de costa em estudo, virada a sul, organiza-se em dois alinhamentos principais: um, com orientação SW-NE, entre a Praia da Rainha e o Monte Estoril; outro, NW-SE, entre o Monte Estoril e o Forte de São Julião da Barra (Figura 3.3). Este litoral apresenta-se maioritariamente rochoso e de arribas, cujo desenvolvimento depende de controle estrutural e litológico. A orientação do bordo superior das arribas, bem como da sua vertente exposta, reflete o rumo dos principais acidentes tectónicos e massas filoneanas.

O perfil das arribas é geralmente escarpado, refletindo a presença de camadas espessas e mais resistentes à erosão a topo, e também irregular, refletindo a alternância de camadas mais e menos resistentes à erosão. A altura das arribas é variável entre 5 e 15 m (20 m na Azarujinha), decrescendo em geral para leste (Taborda *et al.*, 2010). No sopé, as arribas confinam com plataforma de abrasão intertidal ou com fundo, também rochoso, mas subtidal, embora a pequena profundidade, ocorrendo pontualmente escassa cobertura sedimentar arenosa ou cascalhenta (Taborda *et al.*, 2010).

As praias correspondem a recortes côncavos da arriba e a foz de ribeiras, que proporcionam espaço e morfologia adequados à acumulação sedimentar, resultando em pequenas praias encaixadas. A alimentação está condicionada pela fraca afluência de sedimentos provenientes de fontes externas de natureza fluvial, devido à forte ocupação urbana, extensa impermeabilização superficial e regularização de caudais nas bacias hidrográficas interessadas. Mesmo em regime natural seria já reduzida, devido às características geológicas, geomorfológicas e hídricas locais (Taborda *et al.*, 2010).

Os troços litorais cascalenses onde ocorrem arribas livres de intervenções de regularização ou contenção, são classificadas no Plano Estratégico de Cascais face às Alterações Climáticas, de 2010, como instáveis, e em muitos pontos oferecem risco de queda de blocos (Taborda *et al.*, 2010). Em muitos locais é visível a acumulação de blocos no sopé das arribas, demonstrando o estado de atividade (Figura 3.9). O caso mais relevante é o do troço Praia das Avenças – Forte de Santo António da Barra, onde se registou um movimento de massa de vertente com recuo local máximo de 7 m entre 1942 e 2008; as razões (antropogénicas, meteorológicas ou oceanográficas) para a sua ocorrência permanecem por esclarecer (Taborda *et al.*, 2010).

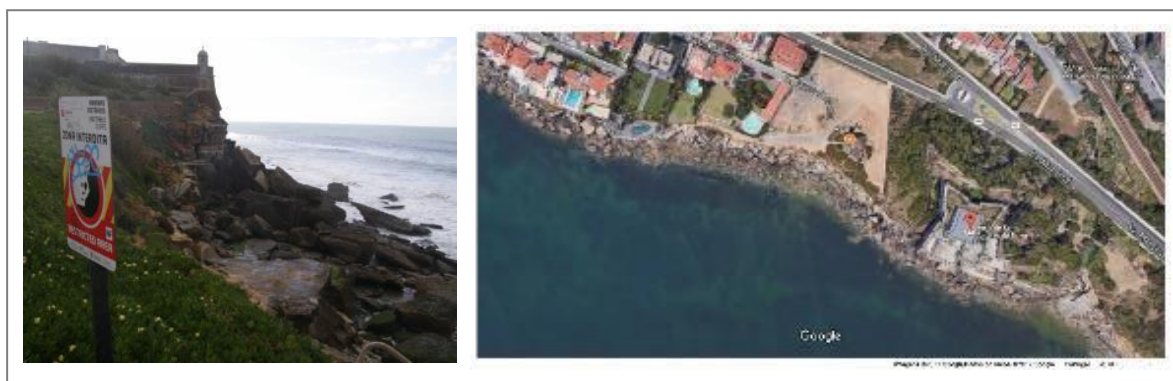


Figura 3.9. Fotografia de terreno obtida em 31.07.2017 e vista de satélite do litoral de arriba na zona do Forte de Santo António da Barra

### 3.4. REGISTOS DOCUMENTAIS DE EVENTOS DE GALGAMENTO

Foi feito um levantamento dos registos correspondentes a eventos de galgamento costeiro recorrendo a informação disponibilizada pelos Serviços Municipais de Proteção Civil de Cascais (SMPC Cascais) e divulgada através dos meios de comunicação social. A informação disponível é, contudo, escassa e pouco detalhada.

A Polícia Marítima interdita o passeio marítimo quando existe possibilidade de galgamento, mas a avaliação dessa probabilidade é subjetiva e, quando o galgamento ocorre, não existe acompanhamento nem registos sistematizados do evento e dos danos provocados. A Tabela 3.1 reúne os elementos compilados neste trabalho sobre galgamento no troço em estudo, e os detalhes a que se teve acesso encontram-se no Anexo A.

Tabela 3.1. Quadro resumo - Ocorrência de eventos de galgamento costeiro no troço em estudo entre 2009 e 2017.

Registo de Ocorrência	Data e Hora	Locais	Descrição
Nº 1	17/02/2011	Praia do Tamariz	Galgamento do paredão com estragos nos equipamentos
Nº 2	20/02/2011 (Madrugada)	Praias do Tamariz, das Moitas e de Carcavelos	Estragos no paredão, linha de Cascais e quebras de vidros de restaurantes
Nº 3	06/01/2014 19:50	Praias do Tamariz, da Duquesa, das Moitas, da Poça, da Azarujinha, das Avenças, e de Carcavelos, Paredão – Monte Estoril, e Paredão entre a praia do Tamariz e a praia da Poça.	Estragos no passeio marítimo, em estabelecimentos de restauração, nos apoios de praia e em equipamentos e infraestruturas. Tempestade Hércules.
Nº 4	07/01/2014 08:35		
Nº 5	08/02/2014 16:00	Praia do Tamariz	Forte agitação marítima
Nº 6	09/02/2014 23:55	Praia da Parede	Forte agitação marítima
Nº 7	15/02/2014 15:15	Avenida Marginal na zona da Parede	Forte agitação marítima
Nº 8	03/03/2014 16:00	Praias do Tamariz, da Poça e da Azarujinha	Fecho do passeio marítimo entre o Tamariz e a Azarujinha devido à agitação marítima.
Nº 9	28/10/2015 15:00	Praias do Tamariz, da Parede e de Carcavelos	Galgamentos, com alguns danos nas infraestruturas
Nº 10	02/02/2017 (Tarde)	Monte Estoril, Praias da Poça, Azarujinha, São Pedro do Estoril e Parede	Galgamentos, sem danos. Fecho do passeio marítimo entre o Tamariz e a Azarujinha. Tempestade Dóris.

### 3.5. ESTRUTURAS COSTEIRAS ANALISADAS

O troço litoral entre Cascais e Carcavelos exibe elevada diversidade geomorfológica (já referida acima). Por isso, a abordagem seguida foi a de caracterizar através de perfis-tipo os diferentes domínios ao longo da costa, em função da geometria do perfil transversal e das características dos elementos (naturais ou construídos) que o constituem. Foram considerados 4 tipos fundamentais de perfis, doravante designados por Perfil-Tipo A a D, distribuídos ao longo da linha de costa, como apresentado na Figura 3.10. Cada perfil-tipo ocorre em um ou mais locais, como indicado na Figura 3.11.

- **Perfil-Tipo A:** Estrutura aderente de proteção na interface com o mar, e passeio marítimo
  - A.ME - Monte Estoril
- **Perfil-Tipo B:** Praia limitada no tardoz por estrutura aderente vertical com passeio marítimo no coroamento da obra aderente
  - B.TM – Praia do Tamariz
  - B.PC – Praia da Poça
  - B.SP – Praia São Pedro do Estoril

- B.GC – Praia dos Gémeos (Carcavelos)
- B.MC – Praia do Moinho (Carcavelos)
- **Perfil-Tipo C:** Arriba com estrutura de defesa aderente vertical e passeio marítimo no sopé
  - C.FC – Forte da Cadaveira
- **Perfil-Tipo D:** Arriba articulada no sopé com plataforma rochosa
  - D.FB – Forte Santo António da Barra

Apesar do perfil-tipo D ser o que predomina neste litoral, não é, à partida, um perfil exposto a eventos de galgamento costeiro, daí a preferência ter recaído sobre perfis baixos contendo praias, correspondendo ao perfil-tipo B. Os perfis-tipo B são os que apresentam, genericamente, maior risco, tanto pela perigosidade, associada à exposição, como devido à vulnerabilidade, visto que nestes se desenvolvem atividades lúdicas e neles foram implementadas estruturas de apoio a essas atividades.



Figura 3.10. Distribuição dos perfis-tipo no troço costeiro Cascais-Carcavelos



Figura 3.11. Localização dos perfis estudados



Os perfis foram obtidos através de levantamento de campo, complementado com informação topobatemétrica disponível (Modelo Digital do Terreno das Zonas Costeiras de Portugal Continental - LiDAR (Continente), com resolução de 1 m (400 m de largura para terra da linha de costa), (DGTerritório, 2011)) e ortofotomapas de 2008 (DGTerritório, 2009). Estes levantamentos foram processados com recurso ao *software* ArcGIS 10.2.2. O levantamento topográfico de terreno, foi realizado nos dias 31.03 e 14.10 de 2017, recorrendo a uma estação de DGPS.

As peças desenhadas correspondentes aos perfis podem ser encontradas no Anexo B, e de seguida, faz-se uma breve descrição de cada perfil estudado.

### Perfil A

A zona do Monte Estoril é a única que apresenta um perfil-tipo A, representado aqui pelo perfil *PA.ME* (Figura 3.12 e Figura 3.13). Este é um perfil totalmente artificializado, com uma estrutura aderente, junto ao mar, composta por um talude em enrocamento, coroada pelo passeio marítimo. A montante da estrutura de defesa encontra-se a linha ferroviária (Linha de Cascais).

### Monte Estoril – PA.ME

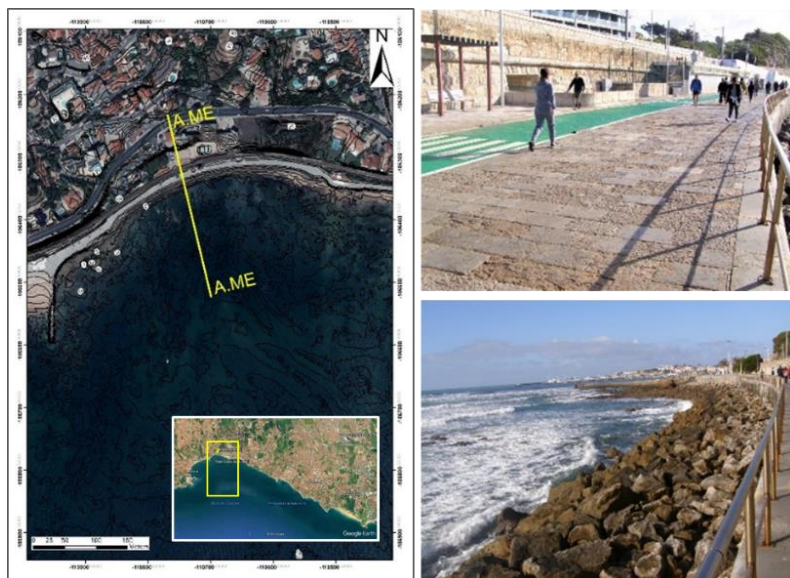


Figura 3.12. Passeio Marítimo - Monte Estoril

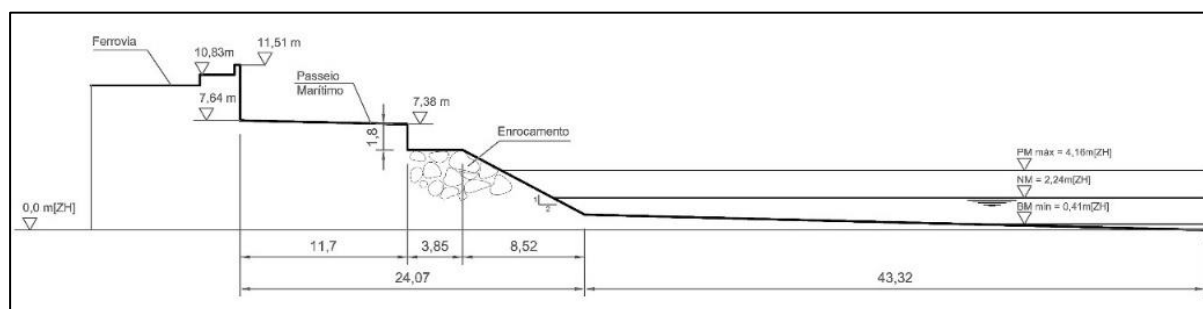


Figura 3.13. Perfil A.ME - Monte Estoril



### Perfil B

Os Perfis do tipo B têm uma presença recorrente ao longo de todo o troço estudado e são caracterizados por incluírem uma praia de areia (com uma única berma ou apenas representada pela face) limitada no tardoz pelo passeio marítimo que se desenvolve a cotas variáveis entre 7.5 e 10.0 m (ZH). No passeio marítimo existem diversos espaços dedicados maioritariamente à restauração, com esplanadas.

As praias escolhidas para esta análise foram a praia do Tamariz, da Poça, de São Pedro do Estoril, dos Gémeos e a do Moinho (Figura 3.14, Figura 3.16, Figura 3.18, Figura 3.20 e Figura 3.22). Estas praias foram escolhidas por já terem sido alvo de eventos de galgamento (Tabela 3.1). Em cada praia, foi escolhido um perfil representativo (Figura 3.15, Figura 3.17, Figura 3.19, Figura 3.21 e Figura 3.23).

### Praia do Tamariz – PB.TZ



Figura 3.14. Praia do Tamariz

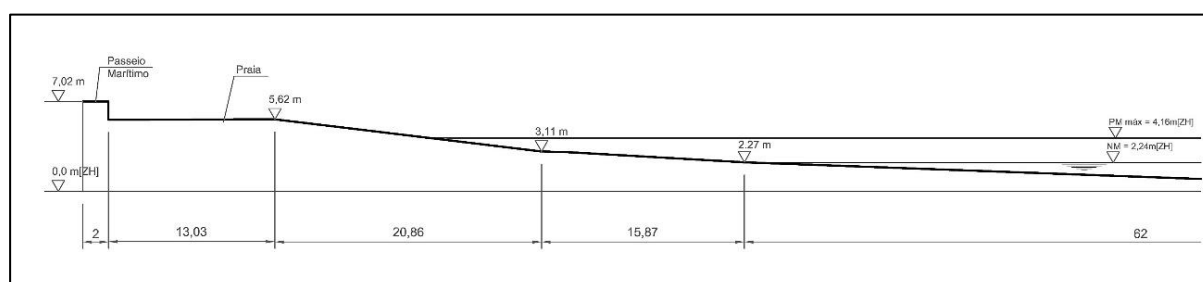


Figura 3.15. Perfil B.TM

### Praia da Poça – PB.PC



Figura 3.16. Praia da Poça

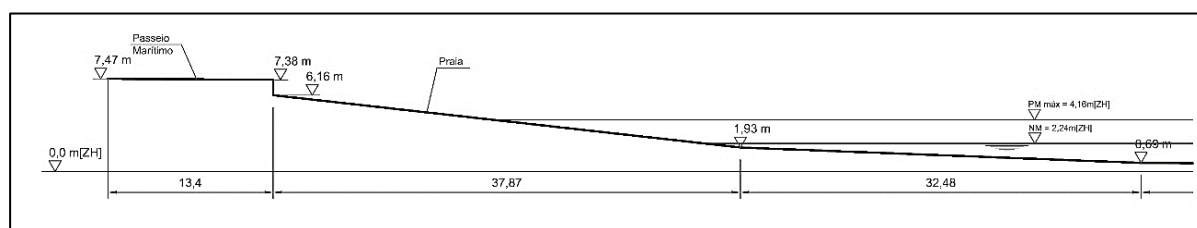


Figura 3.17. Perfil B.PC

### Praia de São Pedro do Estoril – PB.SP



Figura 3.18. Praia de São Pedro do Estoril

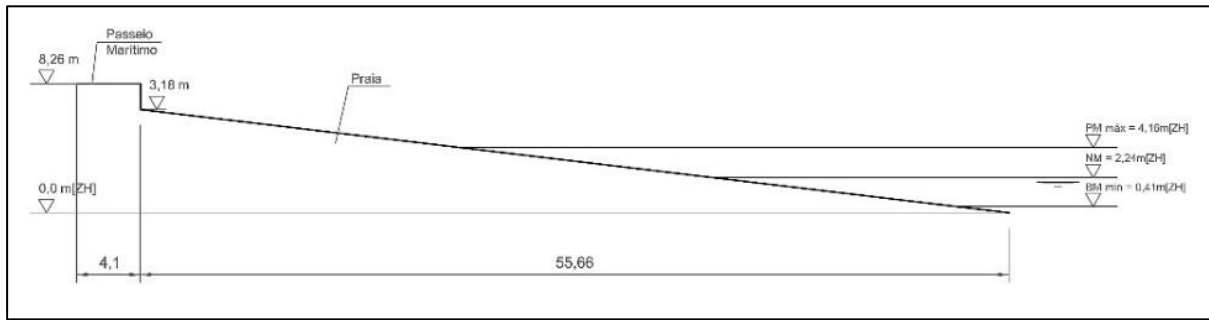


Figura 3.19. Perfil B.SP

### Praia dos Gémeos (Carcavelos) – PB.GC



Figura 3.20. Praia dos Gémeos - Carcavelos

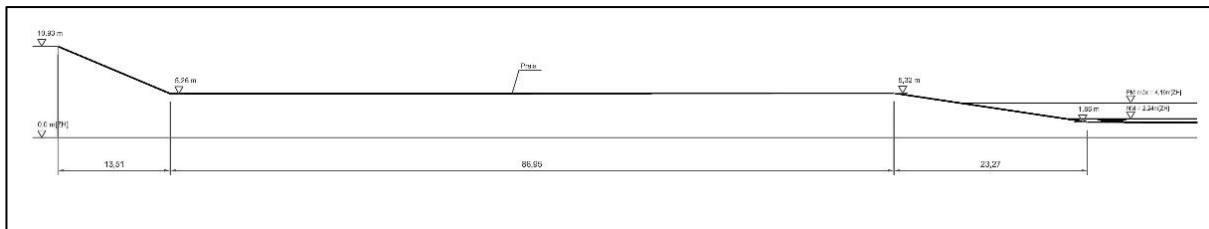


Figura 3.21. Perfil B.GC

### Praia do Moinho (Carcavelos) – PB.MC



Figura 3.22. Praia do Moinho - Carcavelos

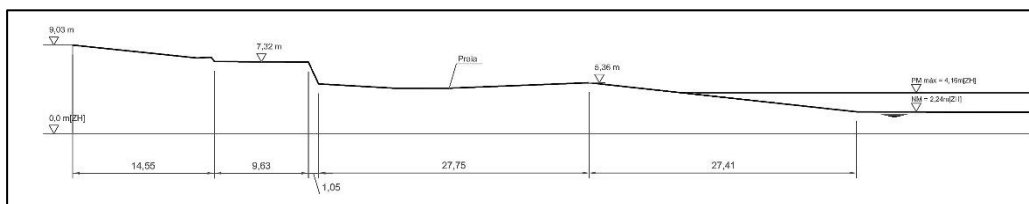


Figura 3.23. Perfil B.MC

### Perfil C

Estes perfis, compreendem uma arriba, geralmente intervencionada, com crista a cotas elevadas, mas possuem no seu sopé infraestruturas utilizáveis para circulação de pessoas, como o passeio marítimo, no qual em alguns casos foram instalados equipamentos de apoio de praia, tais como postos de venda de gelados. Por sua vez, o passeio confina com uma praia de areia estreita.

### Forte da Cadaveira, Praia da Poça– PC.FC



Figura 3.24. Praia da Poça, zona do Forte da Cadaveira

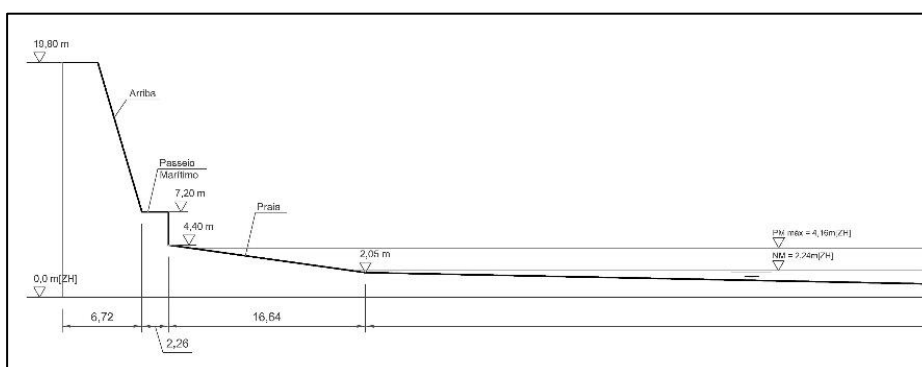


Figura 3.25. Perfil C.FC

### Perfil D

A tipologia ilustrada pelo perfil D ocorre em numerosos segmentos do litoral em estudo. Este tipo de perfil é constituído por arribas pouco intervencionadas, com edificações localizadas sobre, ou a curta distância, da crista. Entre edificações de uso habitacional, existe também património classificado, tais como antigos fortes, e edifícios dedicados à restauração e atividades similares. Nestes perfis a arriba confina com uma plataforma de abrasão, sem praia.



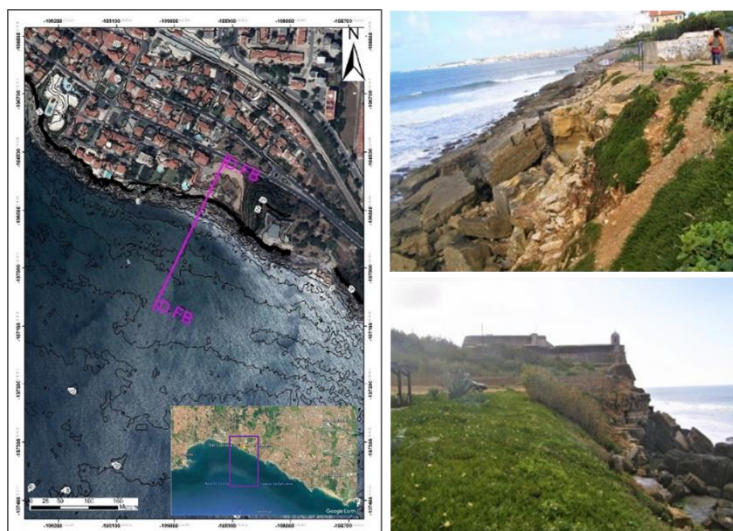


Figura 3.26. Arriba junto ao Forte Santo António da Barra

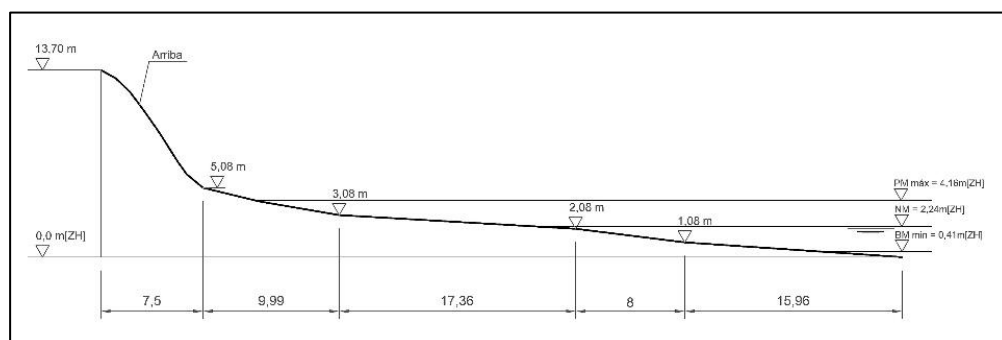


Figura 3.27. Perfil D.FB

### 3.6. FORÇAMENTO OCEANOGRÁFICO

#### 3.6.1. Variações do Nível do Mar

O regime de marés na zona de Cascais é do tipo semi-diurno, com amplitude do tipo mesotidal. Na Tabela 3.2 são apresentados os valores médios e extremos da maré em Cascais, entre 2001 e 2017, que resultam da compilação dos dados disponibilizados no *site* da FCUL (Antunes, 2018) e do trabalho de Antunes (2013), ver Anexo C. As alturas referem-se ao Zero Hidrográfico (o *datum* convencional situa-se 2.08 m abaixo do nível médio de 1938, estabelecido em Cascais).

Tabela 3.2. Tabela de médias e valores extremos da altura da maré astronómica com subida do NMM (m ZH) em Cascais (2001 – 2017)

PMmax	PMAV	PMmed	PMAM	PMmin	NMM	BMmax	BMAM	BMmed	BMAV	BMmin
4.16	3.62	3.28	2.90	2.47	2.24	1.98	1.57	1.20	0.87	0.41

Neste estudo, a modelação da propagação da agitação marítima e o cálculo do galgamento incluíram a variação da superfície livre do mar induzida por maré astronómica, sobrelevação meteorológica (*storm surge*) e subida do NMM, obtida através dos registos horários do marégrafo de Cascais entre 2009 e 2015, totalizando 61344 entradas. Cerca de 14% das entradas, sem registos, foram colmatadas com dados de previsão de maré astronómica para Cascais, previsão de Antunes (2018), que inclui a subida do NMM.

### 3.6.2. Agitação Marítima

O troço de costa em análise localiza-se no litoral ocidental, onde predomina ondulação de noroeste associada a área de geração no Atlântico Norte. No entanto, a sua orientação, este-oeste, abriga-o da agitação predominante, como referido anteriormente.

Foi considerado o forçamento oceanográfico devido à agitação marítima utilizando dados de retro-análise (*hindcast*) ao largo da zona de estudo (39° N, 10° W), em águas profundas, de 6 em 6 horas, entre 2009 e 2015. Estes dados foram obtidos através de um modelo numérico desenvolvido por Bertin *et al.* (2013) que tem por base o modelo espectral WaveWatch III (Tolman, 2009). Os resultados espectrais foram convertidos para parâmetros integrais compondo assim uma série com 10221 registos de altura significativa,  $H_{m0}$ , período de pico do espectro,  $T_p$ , e rumo médio,  $Dir$ , (Figura 3.28).

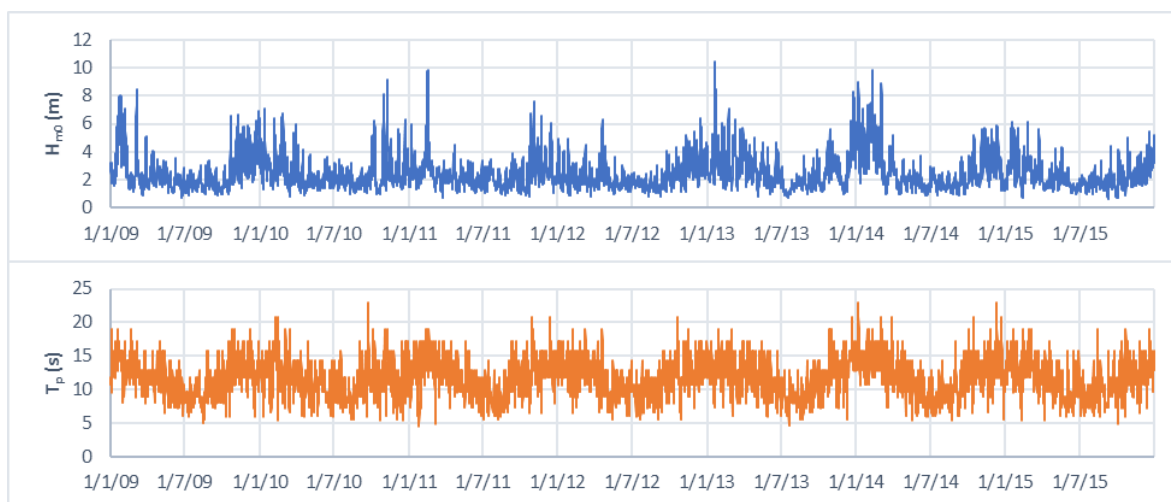


Figura 3.28. Série de dados de agitação marítima entre 2009 e 2015

#### Agitação em águas profundas

A série de dados em águas profundas foi utilizada para obter uma caracterização global da agitação e uma caracterização sazonal, dividindo o ano civil numa estação de inverno marítimo (outubro a março), tipicamente mais energético, e noutra de verão marítimo (abril a setembro), tipicamente menos energética, doravante designadas por estações de inverno e verão, respetivamente. Como se pode ver nas distribuições mensal da altura significativa das ondas e do período de pico apresentadas nas Figura 3.29 e Figura 3.30.

Entre 2009 e 2015, a altura significativa máxima verificada foi de 10.4 m (19-01-2013), e o período máximo de 23 s (23-09-2010). A caracterização da agitação ao largo, no período estudado, é descrita na Tabela 3.3 pelos valores extremos, médios e respetivo desvio padrão, medianos e os quartis de 25% e 75%.

Tabela 3.3. Caracterização estatística da agitação ao largo, entre 2009 e 2015.

Parâmetros	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Mediana	Q25%	Q75%
$H_{m0}$ (m)	10.4	0.6	2.5	1.2	2.1	1.6	3.0
$T_p$ (s)	23	5	12	3	12	10	13

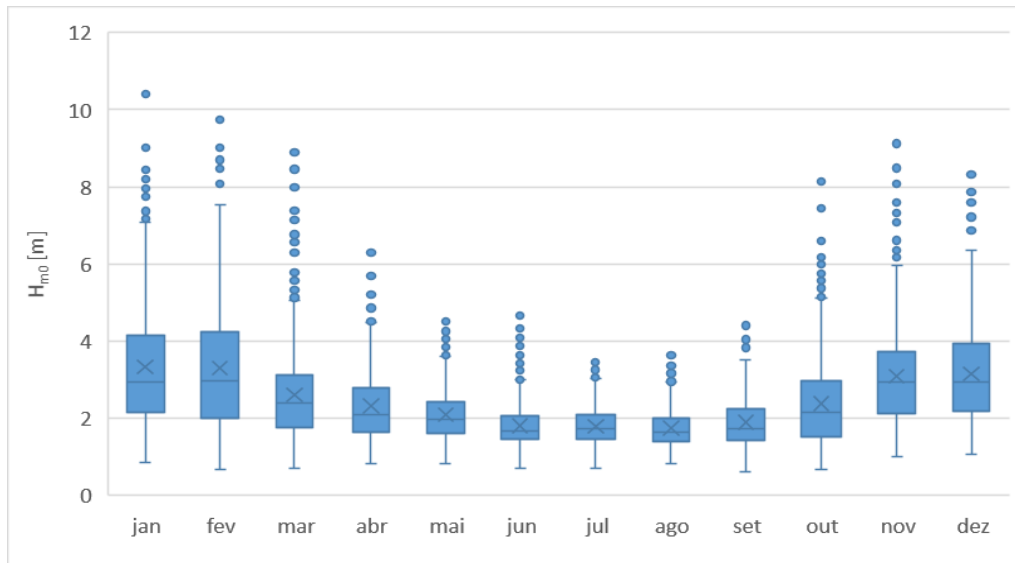


Figura 3.29. Variação mensal de  $H_{m0}$ , ao largo, entre 2009 e 2015 (diagrama de extremos e quartis, com a representação da média, mediana e valores atípicos)

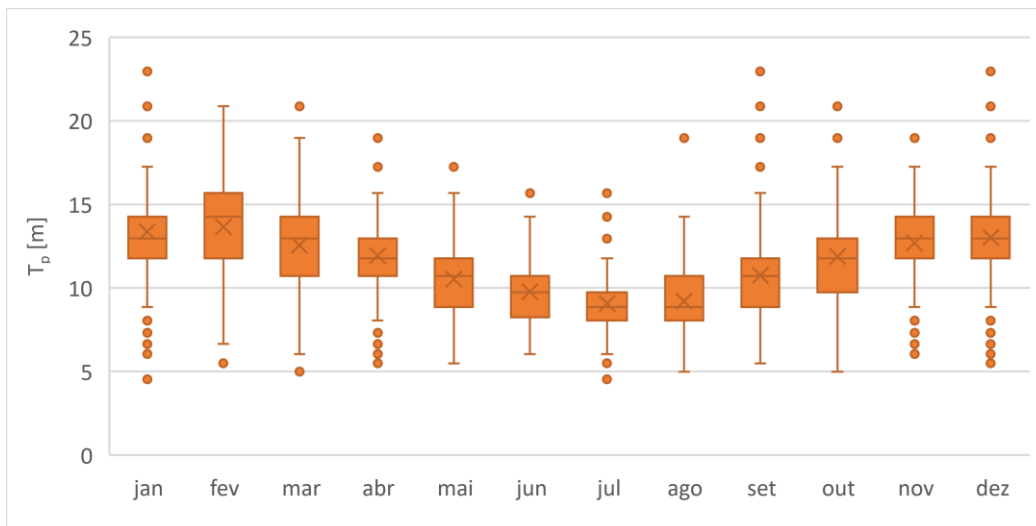


Figura 3.30. Variação mensal de  $T_p$ , ao largo, entre 2009 e 2015 (diagrama de extremos e quartis, com a representação da média, mediana e valores atípicos)

Os dados confirmam a predominância de agitação com rumo NW e NNW (Figura 3.31.a1) na costa oeste portuguesa, verificando-se que no inverno encontra-se mais a NW e no verão está um pouco mais rodada a norte com rumo NNW (Figura 3.31.a2).

As alturas significativas das ondas ao largo estão maioritariamente compreendidas entre 1.0 m e 3.5 m (82% das ocorrências) (Figura 3.31.b1). No entanto, no inverno registam-se com frequência ondas de maior altura: 79% das ocorrências apresenta alturas significativas entre 1.0 m e 5.0 m. No verão, 80% das ocorrências estão compreendidas entre 1.0 m e 2.5 m (Figura 3.31.b2). As maiores ondas de inverno apresentam um rumo NW a WNW (Figura 3.31.c2), indicando que em regime de tempestade a agitação roda em sentido anti-horário, relativamente ao regime predominante.

Também o período de pico do espectro apresenta diferenças sazonais, com valores superiores no inverno, associados a alturas significativas maiores (Figura 3.31.d2 e e2).

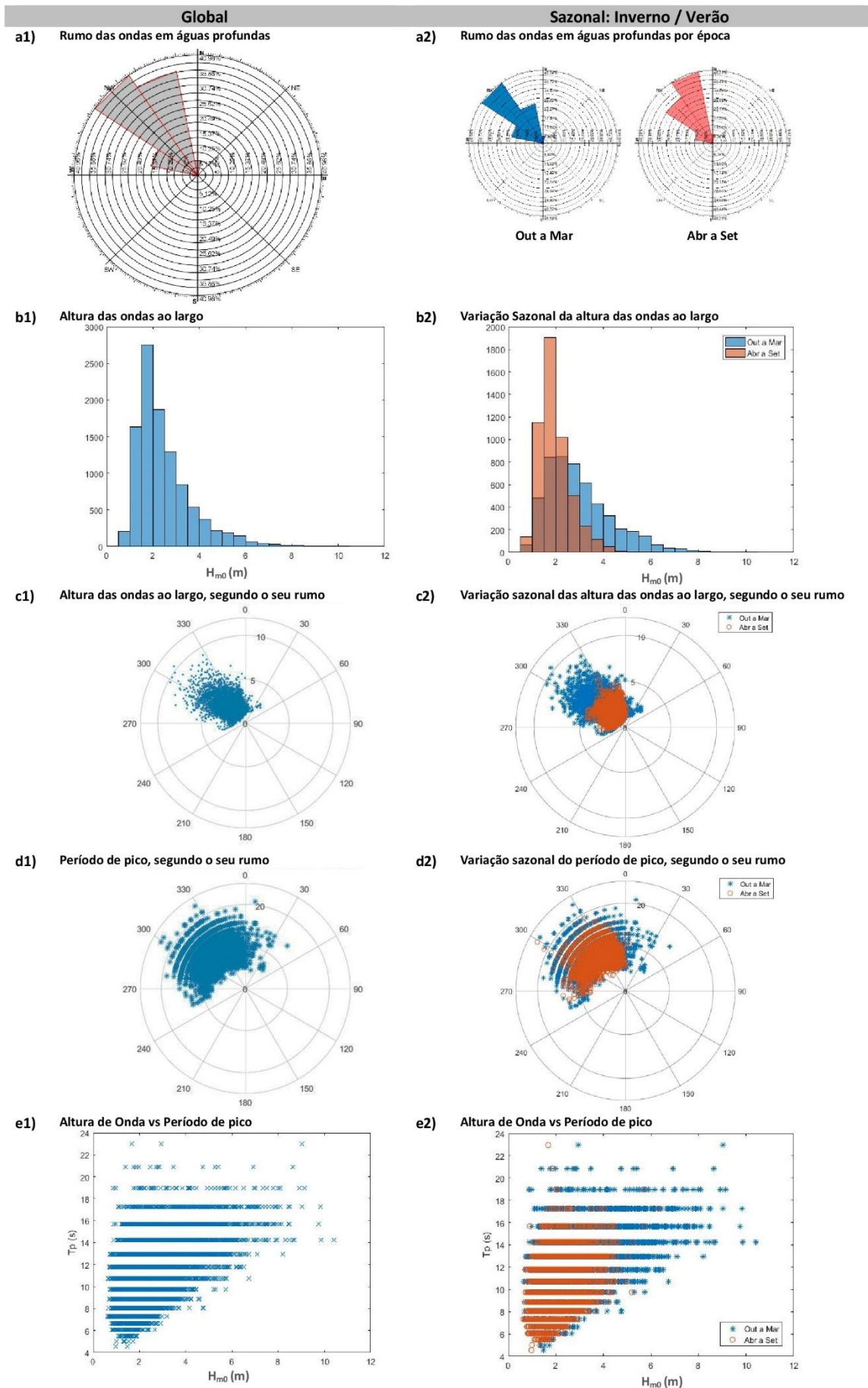


Figura 3.31. Agitação marítima ao largo: altura significativa, rumo e período de pico. Distribuição global e por estações entre 2009 e 2015



## Agitação costeira

A propagação das ondas do largo para a costa foi modelada com recurso ao modelo numérico de refração espectral SWAN – *Simulating Waves Nearshore*, desenvolvido pela *Delft University of Technology* (TU Delft).

O SWAN é um modelo de propagação da agitação marítima até à zona de rebentação, que pode considerar os efeitos da presença de correntes e a geração de ondas pelo vento local (Carmo, 2016). Este modelo simula a propagação da onda através de análise *Euleriana* da equação espectral discreta do balanço da ação da onda, resolvendo a equação da conservação da ação da onda (Carmo, 2016). Dos parâmetros obtidos, destacam-se: a altura significativa,  $H_s$ , os períodos de pico,  $T_p$ , e médio,  $T_m$ , e os rumos de pico,  $Dir_p$ , e médio,  $Dir_m$  (SWAN, 2018).

A agitação costeira foi analisada através da caracterização da agitação marítima em 7 pontos alvo, distribuídos ao longo da costa (Figura 3.32e Tabela 3.4): três pontos perto da batimétrica dos 15 m, e outros 4 mais junto à costa. Diferenciam-se, assim, 3 subtroços de costa: o primeiro (*subtroço I*) definido pelos pontos 1, 4 e 5; o segundo (*subtroço II*) pelos pontos 2 e 6; e um terceiro (*subtroço III*) pelos pontos 3 e 7.



Figura 3.32. Localização dos pontos de caracterização da agitação marítima junto à costa

Tabela 3.4. Descrição dos pontos alvo ou de chegada (sistema de coordenadas ETRS\_1989\_Portugal\_TM06)

Pontos ID	Símbolo	Coordenadas		Profundidade (m ZH)
		X (m)	Y (m)	
1		-110239	-110239	15.4
2		-107742	-107742	15.2
3		-105952	-105952	15.2
4		-110630	-110630	7.6
5		-109630	-109630	6.2
6		-107439	-107439	6.7
7		-105151	-105151	10.0

### Condições de aplicação do SWAN

Os dados de entrada do modelo SWAN aqui utilizados foram os da série de dados reconstruídos de agitação marítima em águas profundas entre 2009-2015, acima descrita. Usaram-se duas malhas batimétricas: uma com resolução de 1000 m (IH, 2013); e outra de maior resolução (100 m) na zona de Cascais (IH, 2012). Não foram utilizados dados de campos de ventos nem de correntes nos parâmetros de entrada.

Foram utilizadas 3 grelhas computacionais encaixadas (*computational grids*) (Figura 3.33), *Main Grid*, *Nested Grid* e *Nested Grid\_1* com 1000 m, 500 m e 100 m de resolução, respetivamente.

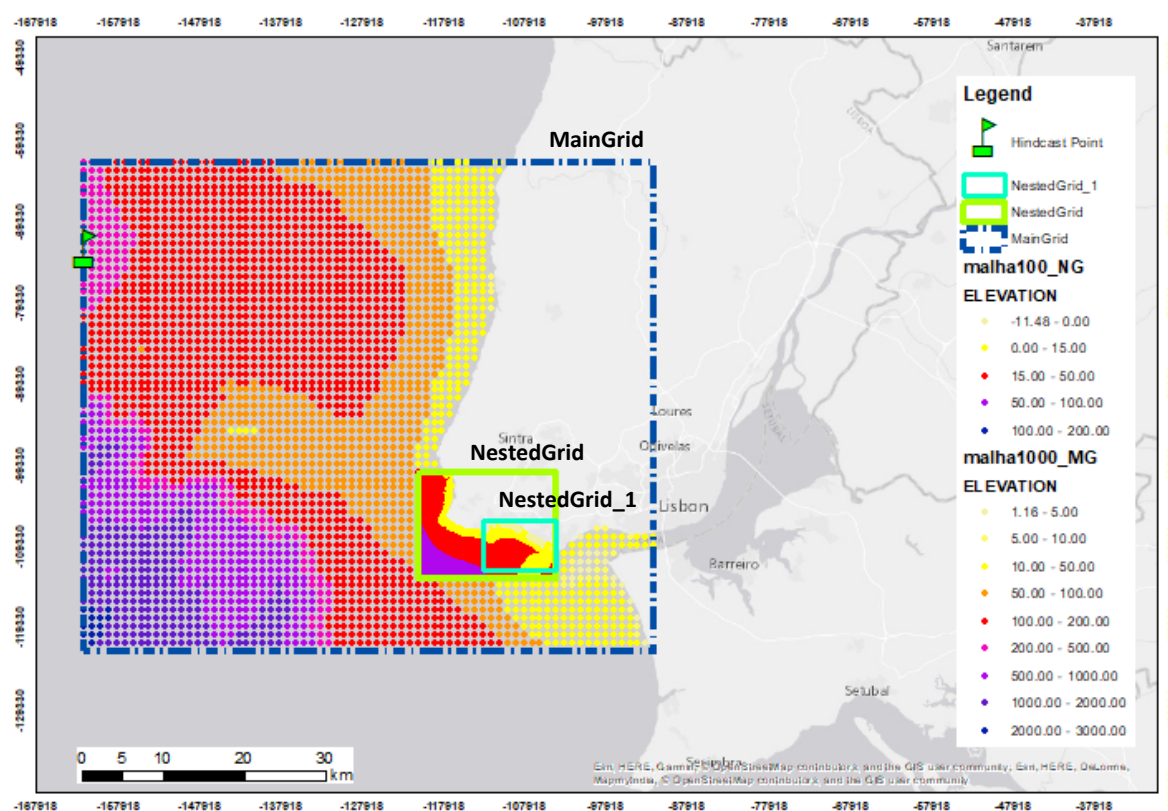


Figura 3.33. Sistema de malhas encaixadas utilizado

Partindo dos valores integrais de  $H_{m0}$  e  $T_p$ , recorreu-se ao espectro de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*), de 24 intervalos, com mínimo de  $0.04 \text{ s}^{-1}$  e máximo de  $1 \text{ s}^{-1}$ , para representar a dependência em frequência. Para a distribuição direcional utilizou-se uma resolução direcional de  $360^\circ$  dividida em 90 subdivisões.

### Caracterização do Subtroço I – Pontos 1, 4 e 5

Para a análise da agitação marítima nesta zona foram utilizados os dados obtidos nos Pontos 1, 4 e 5. Como seria de esperar, os valores de altura significativas reduzem-se substancialmente após sofrerem os efeitos de abrigo e da difração provocados pelo contorno do Cabo Raso e pela limitação à altura das ondas devida à batimetria, passando de 2.5 m de altura significativa média ao largo para 0.6 m no Ponto 1 (Tabela 3.3 e Tabela 3.5).

Os parâmetros característicos da agitação não diferem muito entre os 3 pontos em análise, observando-se uma redução maior da altura das ondas no Ponto 4 do que no Ponto 5 (Tabela 3.5 e Figura 3.34), devido ao efeito da Baía de Cascais, e proximidade à ponta rochosa da Cidadela de Cascais.

Tabela 3.5. Caracterização estatística da agitação do subtroço I, entre 2009 e 2015

Parâmetro	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Mediana	Q25%	Q75%
$H_{m0,1}$ [m]	5.2	0.0	0.6	0.7	0.4	0.1	0.9
$H_{m0,4}$ [m]	4.4	0.0	0.6	0.6	0.3	0.1	0.8
$H_{m0,5}$ [m]	4.5	0.0	0.6	0.7	0.3	0.1	0.8
$T_{p,1}$ [s]	22	6	12	3	12	9	14
$T_{p,4}$ [s]	22	6	12	3	12	9	14
$T_{p,5}$ [s]	22	6	12	3	12	9	14

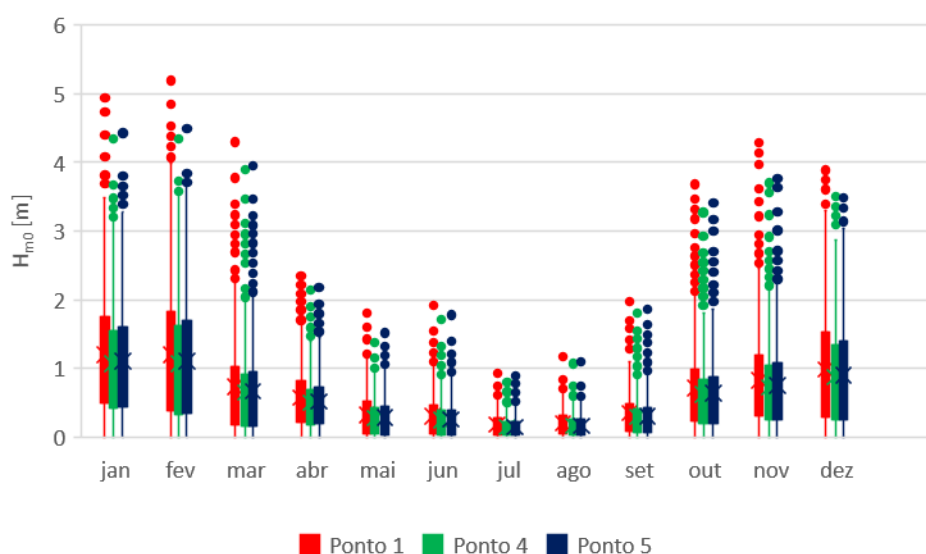


Figura 3.34. Variação estatística mensal de  $H_{m0}$  no Subtroço I, entre 2009 e 2015 (diagrama de extremos e quartis, com a representação da média, mediana e valores atípicos)

Também neste subtroço se verificam alterações das condições de agitação entre as estações inverno e de verão marítimas (Figura 3.35). O rumo da agitação sofre uma pequena alteração, dominando o rumo SW no inverno e WSW/SW no verão. Observa-se também aumento da ocorrência de ondas com maior altura no inverno, reflexo do já verificado ao largo. As ondas mais altas, assim como as de maior período, propagam-se preferencialmente de N 225°.

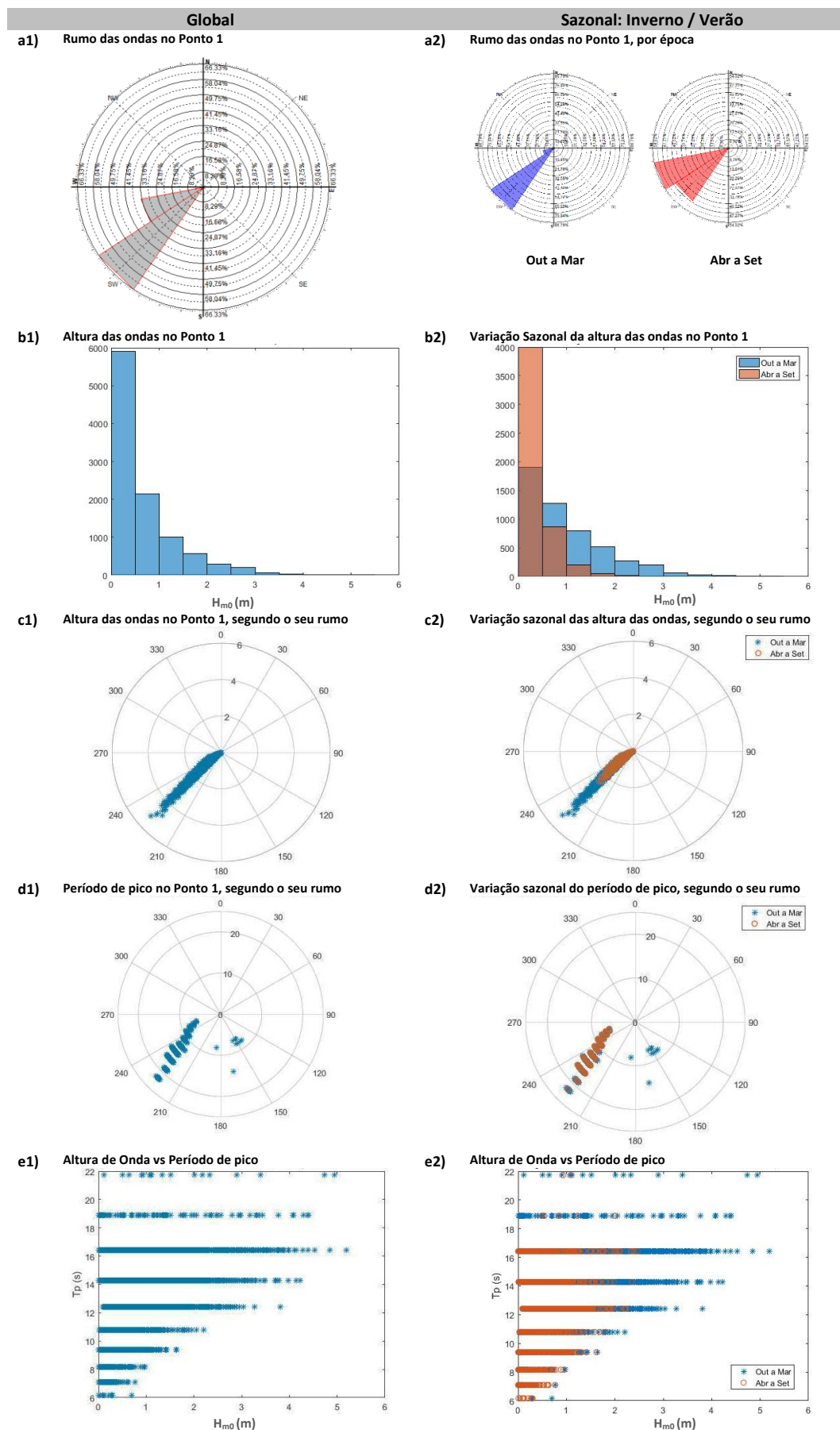


Figura 3.35. Agitação marítima no ponto 1: altura significativa, rumo e período de pico. Distribuição global e por estações, entre 2009 e 2015

### Caracterização do Subtroço II – Pontos 2 e 6

Não se verificaram diferenças relevantes na altura significativa das ondas e no período de pico (Tabela 3.6 e Figura 3.36) determinados para os pontos escolhidos, mantendo-se ainda a ordem de grandeza de valores registados no Ponto 1. Houve, naturalmente, diminuição significativa relativamente aos valores ao largo, devido à configuração da linha de costa.

Tabela 3.6. Caracterização estatística da agitação do subtroço II, entre 2009 e 2015

Parâmetro	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Mediana	Q25%	Q75%
$H_{m0,2}$ [m]	4.8	0.0	0.6	0.7	0.4	0.1	0.9
$H_{m0,6}$ [m]	4.7	0.0	0.6	0.7	0.4	0.1	0.9
$T_{p,2}$ [s]	22	6	12	3	12	9	14
$T_{p,6}$ [s]	22	6	12	3	12	9	14

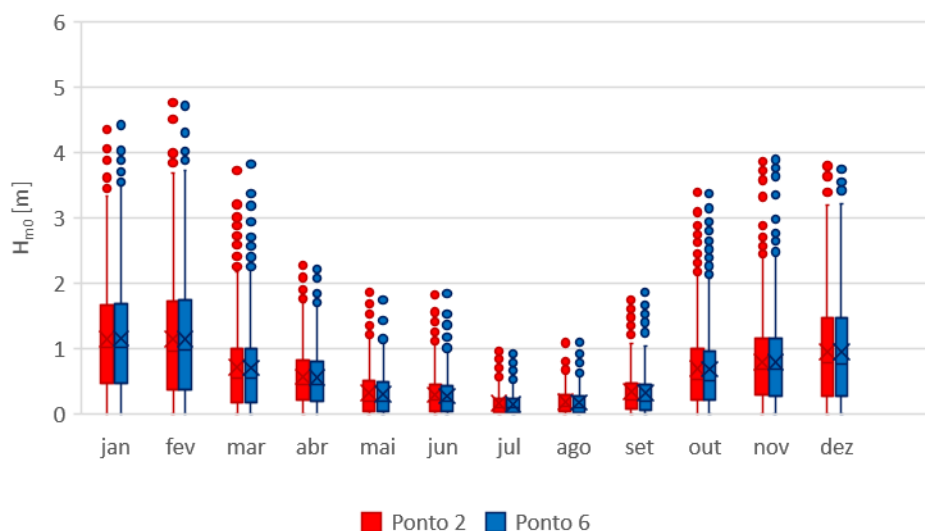


Figura 3.36. Variação estatística mensal de  $H_{m0}$  no Subtroço II, entre 2009 e 2015 (diagrama de extremos e quartis, com a representação da média, mediana e valores atípicos)

No que respeita à sazonalidade (Figura 3.37), não se verificam neste subtroço variações de rumo, mas observam-se aumento da altura da agitação do verão para o inverno. Verifica-se que a variação de rumo ao largo não produz efeito neste subtroço, havendo uma predominância de rumos próximo de N 240° das ondas com maior altura e período.



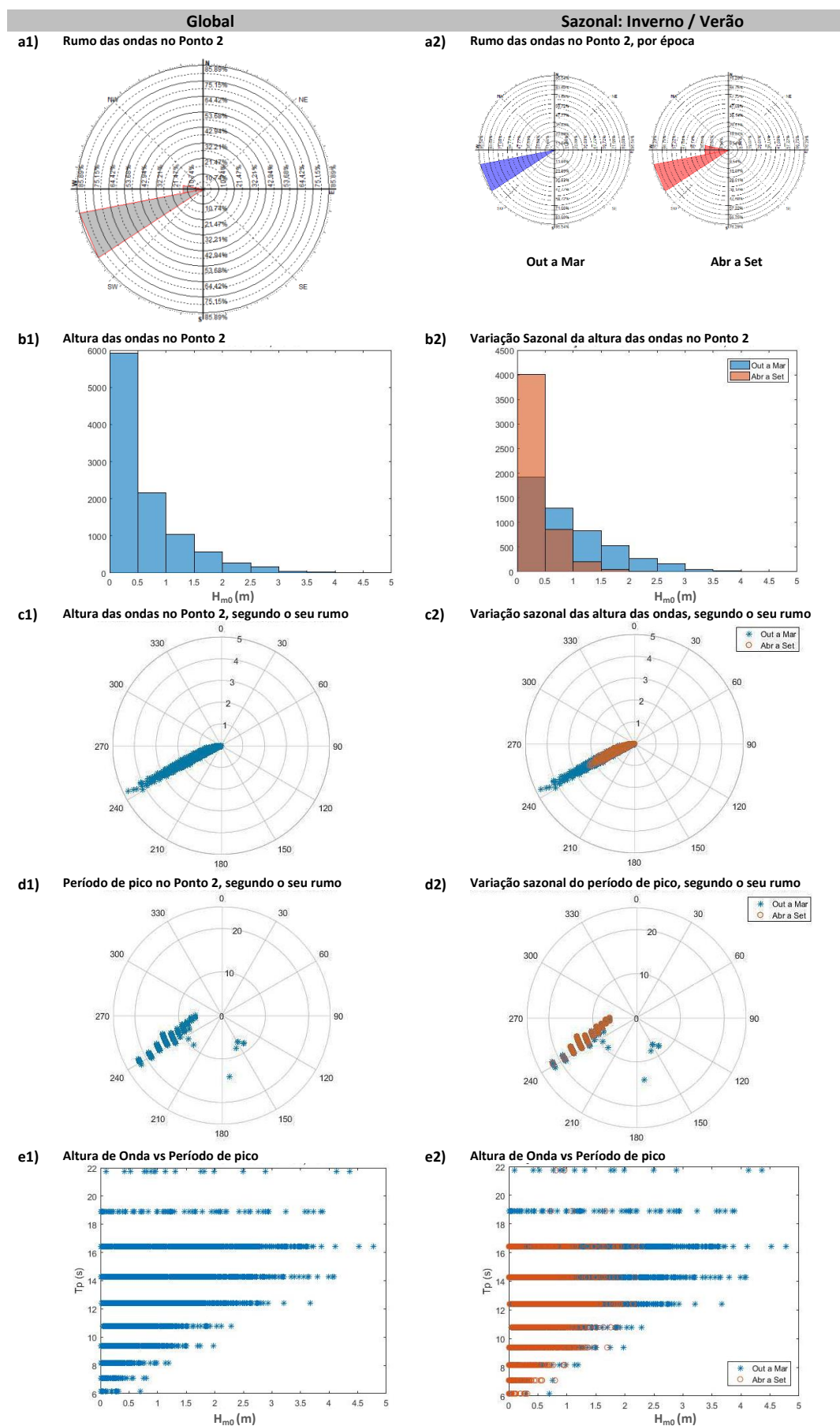


Figura 3.37. Agitação marítima no ponto 2: altura significativa, rumo e período de pico. Distribuição global e por estações entre 2009 e 2015

### Caracterização do Subtroço III – Pontos 3 e 7

Neste subtroço há uma diminuição da altura significativa máxima das ondas que atingem os pontos 3 e 7 relativamente aos valores em águas profundas, não se registando divergências de maior entre ambos (Tabela 3.7 e Figura 3.38), reflexo da diminuição da profundidade. Mantêm-se invariáveis os valores estatísticos do período de pico.

Tabela 3.7. Caracterização estatística da agitação do subtroço III, entre 2009 e 2015.

Parâmetro	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	Mediana	Q25%	Q75%
$H_{s,3}$ [m]	3.6	0.0	0.5	0.5	0.4	0.1	0.8
$H_{s,7}$ [m]	3.2	0.0	0.5	0.5	0.3	0.1	0.7
$T_{p,3}$ [s]	22	5	12	3	12	9	14
$T_{p,7}$ [s]	22	5	12	3	12	9	14

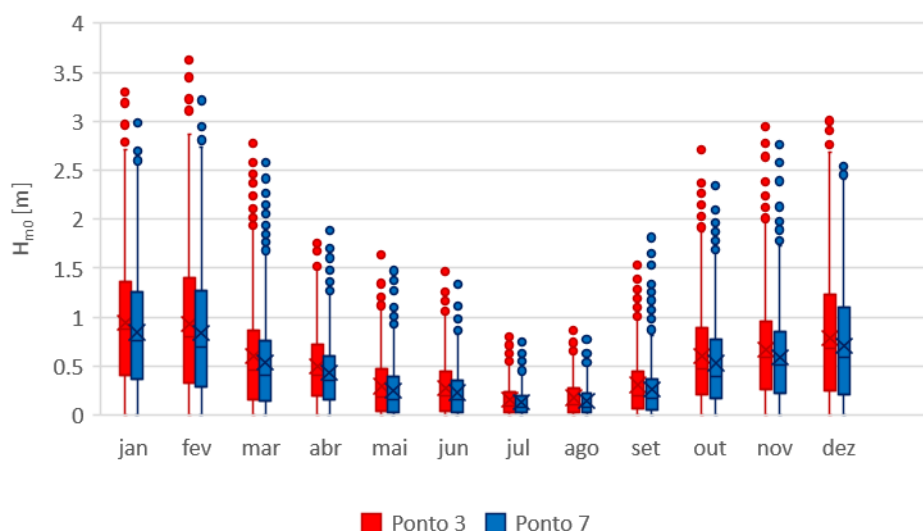


Figura 3.38. Variação estatística mensal de  $H_{m0}$  no Subtroço III, entre 2009 e 2015 (diagrama de extremos e quartis, com a representação da média, mediana e valores atípicos)

No que respeita à sazonalidade, tal como nos restantes subtroço, observa-se o aumento das alturas significativas no inverno (Figura 3.39.b2) e uma predominância do rumo entre  $N 240^\circ$  e  $N 270^\circ$ , com as maiores ondas a aproximarem-se de  $N 265^\circ$  (Figura 3.39.a2 e c2). Neste subtroço a mudança de rumo em relação ao largo não é tão acentuada como nos pontos 1 e 2, diminuindo o efeito da difração provocado pela ponta rochosa da Cidadela de Cascais.

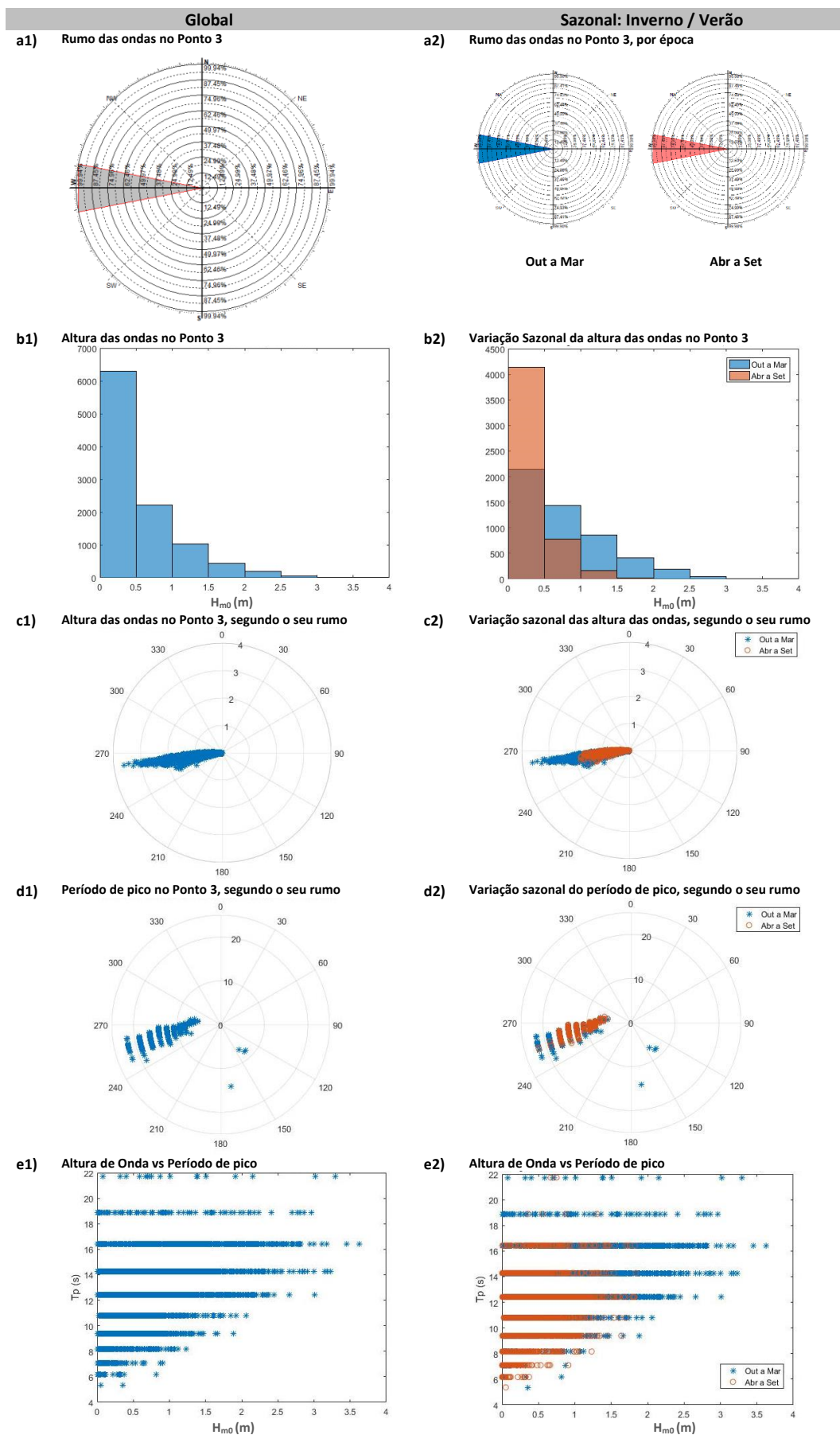


Figura 3.39. Agitação marítima no ponto 3: altura significativa, e período de pico. Distribuição global e por estações, entre 2009 e 2015



### 3.7. MODELOS DE CÁLCULO APLICADOS

Neste estudo, consideraram-se perfis muito diversos (ver capítulo 3.5. Estruturas Costeiras), e nenhum deles é descrito com exatidão pelos modelos de cálculo empíricos, atualmente disponíveis. Assim, foi necessário decidir que método utilizar em cada perfil. A decisão baseou-se na geometria e material de cada perfil-tipo (Tabela 3.8). Para cada perfil escolheram-se dois métodos, de modo a obter resultados comparativos.

Tabela 3.8. Descrição dos perfis e método utilizado

Perfil	Descrição	Conteúdos	Descrição do perfil	Pé da Estrutura	Métodos
A	Defesa costeira aderente	- Blocos de pedra - Passeio Marítimo	- Talude 1:2 - Coroamento horizontal	Emerso/ Submerso	- Ferramenta Neuronal (EurOtop, 2007) - EurOtop (2016), capítulo 6
B	Praia natural limitada por muro e passeio marítimo	- Areia - Muro impermeável - Passeio Marítimo	- Talude suave - Muro vertical - Coroamento horizontal	Emerso	- Mase <i>et al.</i> (2013) - EurOtop (2016), capítulo 5
C	Praia natural limitada por muro e passeio marítimo, com arriba no tardoz	- Areia - Muro impermeável - Passeio Marítimo	- Talude suave - Muro vertical - Coroamento horizontal - Talude rugoso (arriba)	Emerso	- Mase <i>et al.</i> (2013) - EurOtop (2016), capítulo 5
D	Arriba natural	- Plataforma rochosa - Arriba natural	- Talude suave - Talude rugoso (arriba)	Emerso	- Mase <i>et al.</i> (2013) - EurOtop (2016), capítulo 5

O método do Mase *et al.* (2013) foi escolhido para os perfis-tipo B, C e D por ser o que melhor atende ao facto do pé da estrutura se encontrar emerso, e ter um talude suave. Já no caso do perfil-tipo A foi utilizada uma ferramenta neuronal, que é utilizada na análise de estruturas costeiras artificializadas (Coeveld *et al.*, 2005). Como segundo método, comparativo, e para todos os casos, recorreram-se às formulações empíricas descritas em EurOtop (2016).

### 3.8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada perfil, foi estimado o caudal médio galgado para cada um dos 10221 registos de estado do mar, entre 2009 e 2015, recorrendo aos métodos anteriormente descritos.

Neste subcapítulo, são apresentados os dados de entrada de cada perfil, por cada método de cálculo, assim como algumas considerações pertinentes. Seguidamente, apresentam-se os resultados e faz-se uma análise dos mesmos comparando com os registos históricos da ocorrência de galgamentos identificados na região.

#### Perfil-tipo A

Ao longo da costa em estudo, apenas no Monte Estoril se verificam este tipo de estruturas aderentes. Para estes casos, utilizou-se uma ferramenta neuronal, NN\_Overtopping 2, e a formulação empírica descrita em EurOtop (2016), capítulo 6.

Foi adotada uma geometria regular simplificada do perfil, tal como se mostra na Figura 3.40. Para este perfil foram estudados dois pontos passíveis de galgamento, o ponto ME1, à cota 7.38 m, e o ponto ME2 à cota 11.51 m, de modo a avaliar as condições no Passeio Marítimo e na linha ferroviária, respectivamente. Para incorporação do efeito da obliquidade das ondas, foi considerado o alinhamento aproximado da estrutura, do qual se obteve o valor de  $167^\circ$  para o rumo da normal à estrutura.

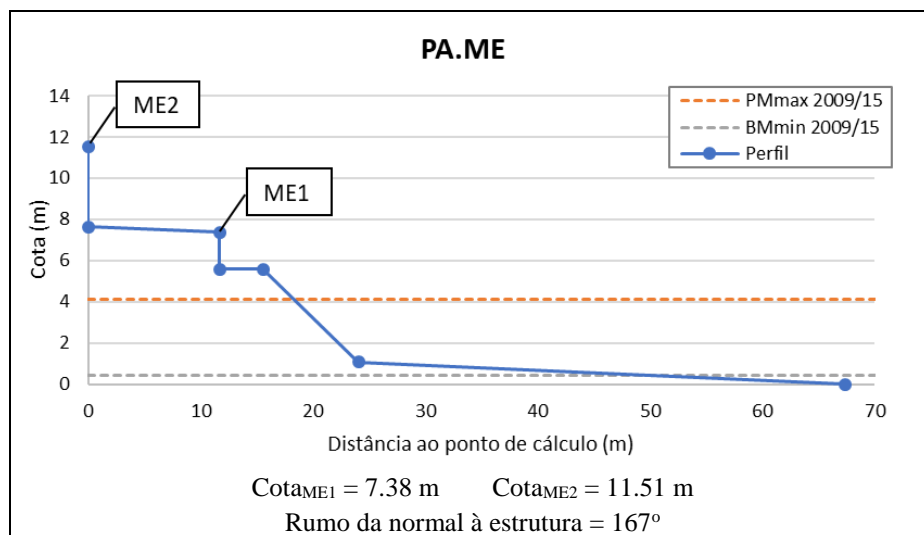


Figura 3.40. Geometria adotada para o perfil-tipo A

Tanto a ferramenta neuronal como o método empírico EurOtop (2016) estão parametrizados para considerar a altura de onda no pé da estrutura. Os dados de entrada para ambos os métodos, e em cada um dos pontos em análise, estão apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9. Input Perfil-tipo A para os modelos de NN\_Overtopping 2 e do EurOtop (2016)

Parâmetro	ME1		ME2	
	NN_Overtopping 2	EurOtop (2016)	NN_Overtopping 2	EurOtop (2016)
$H_{m0\ toe}$ (m)	$\min\{H_{m0,P4}; 0.6 \cdot h\}$			
$T_{m-1,0\ toe}$ (s)	$T_{p,P4}/1.1$			
$\beta$ ( $^\circ$ )	$Dir_{i,P4} - 167$			
$\gamma_f$ (-)	0.50 (enrocamento)		Valor ponderado entre o perímetro do perfil de enrocamento $\gamma_f = 0.5$ e de betão, impermeável, $\gamma_f = 1$ .	
$R_c$ (m)	$7.38 - NM_i$		$11.51 - NM_i$	
$A_c$ (m)	----	----	$7.38 - NM_i$	----
$G_c$ (m)	----	----	11.70 m	----
$h$ (m)	$NM_i - 1.08$	----	$NM_i - 1.08$	----
$h_t$ (m)	$h_i$	----	$h_i$	----
$B_t$ (m)	0.00	----	0.00	----
$B$ (m)	0.00	----	3.85	----
$h_B$ (m)	0.00	----	$NM_i - 5.58$	----
$\cot(\alpha_d)$ (-)	1.89	----	1.89	----
$\cot(\alpha_u)$ (-)	1.89	----	0.00	----
$\tan(\alpha_B)$ (-)	0.00	----	0.00	----
$\tan(\alpha)$ (-)	----	0.528	----	0.528

Os resultados obtidos (Figura 3.41, Figura 3.42) pela ferramenta neuronal são, aproximadamente, uma ordem de grandeza superiores aos obtidos pelo NN\_Overtopping\_2. A relação com os registos históricos é pouco acentuada. No entanto, verificam-se picos em 2011 e 2014 nos dois métodos, sendo algo mais notórios nos resultados obtidos com EurOtop (2016).

Sabe-se que o passeio marítimo sofre interdições à circulação devido a eventos de galgamento, mas ambos os métodos indicam caudais médios muito elevados, que provocariam estragos muito superiores aos relatados nos meios de comunicação social. Além disso, não existem registos de galgamentos da linha ferroviária (ao contrário do projetado pelos modelos), o que poderá ser um indicador de que estes resultados possam estar empolados.

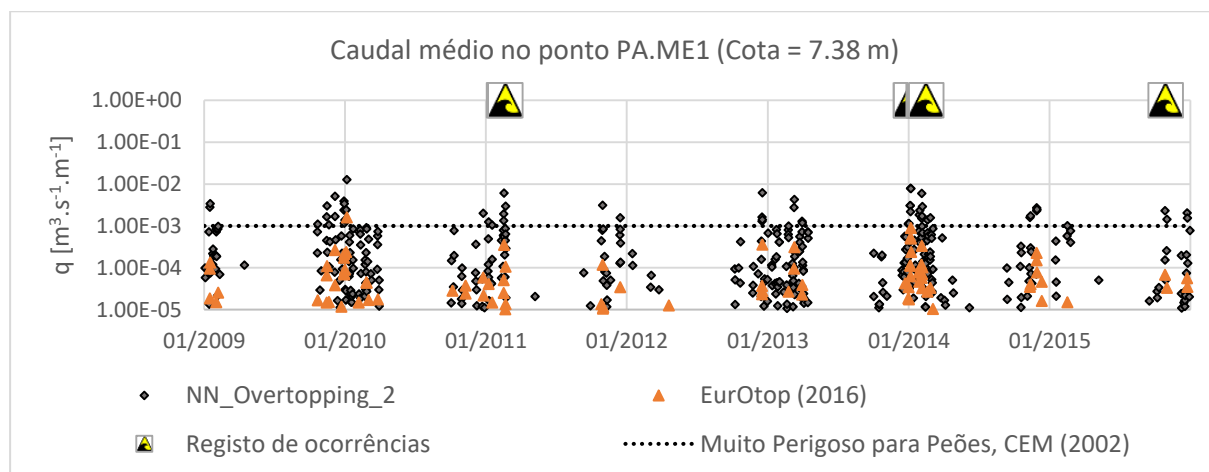


Figura 3.41. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PA.ME1

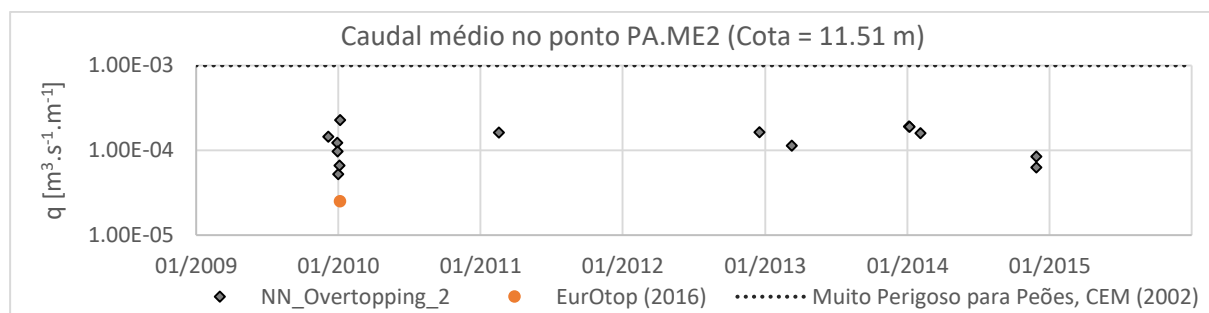


Figura 3.42. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PA.ME2

## Perfis-tipo B, C e D

Para estes três tipos de perfis (B, C e D) recorreu-se a dois métodos empíricos: um proposto por Mase *et al.* (2013); e às formulações descritas no capítulo 5 do EurOtop (2016).

O cômputo do caudal médio galgado nos perfis-tipo B obrigou à adoção de algumas simplificações, a que se discriminam de seguida. Os perfis de praia foram considerados estáticos, não considerando assim o reajuste morfodinâmico da praia em resposta a temporais, ou outros eventos com potencial para remodelar. Foi também admitido que os levantamentos efetuados no campo representam os respetivos perfis de inverno. Em ambos os métodos (Mase *et al.* (2013) e EurOtop (2016)) os perfis que apresentavam segmentos verticais foram retocados à mão livre, impondo-lhes uma pequena diferença angular à verticalidade, para evitar resultados infinitos, e foram adotadas geometrias simplificadas para cada perfil. No caso específico do método do EurOtop (2016) e em contexto de praias foi considerado que a estrutura é composta pela praia e coroamento, admitindo que o “pé da estrutura” se encontra à cota igual à do zero hidrográfico para garantir que este se apresenta sempre submerso.

A geometria dos perfis e localização do ponto de cálculo do caudal médio galgado são apresentadas na Figura 3.43.

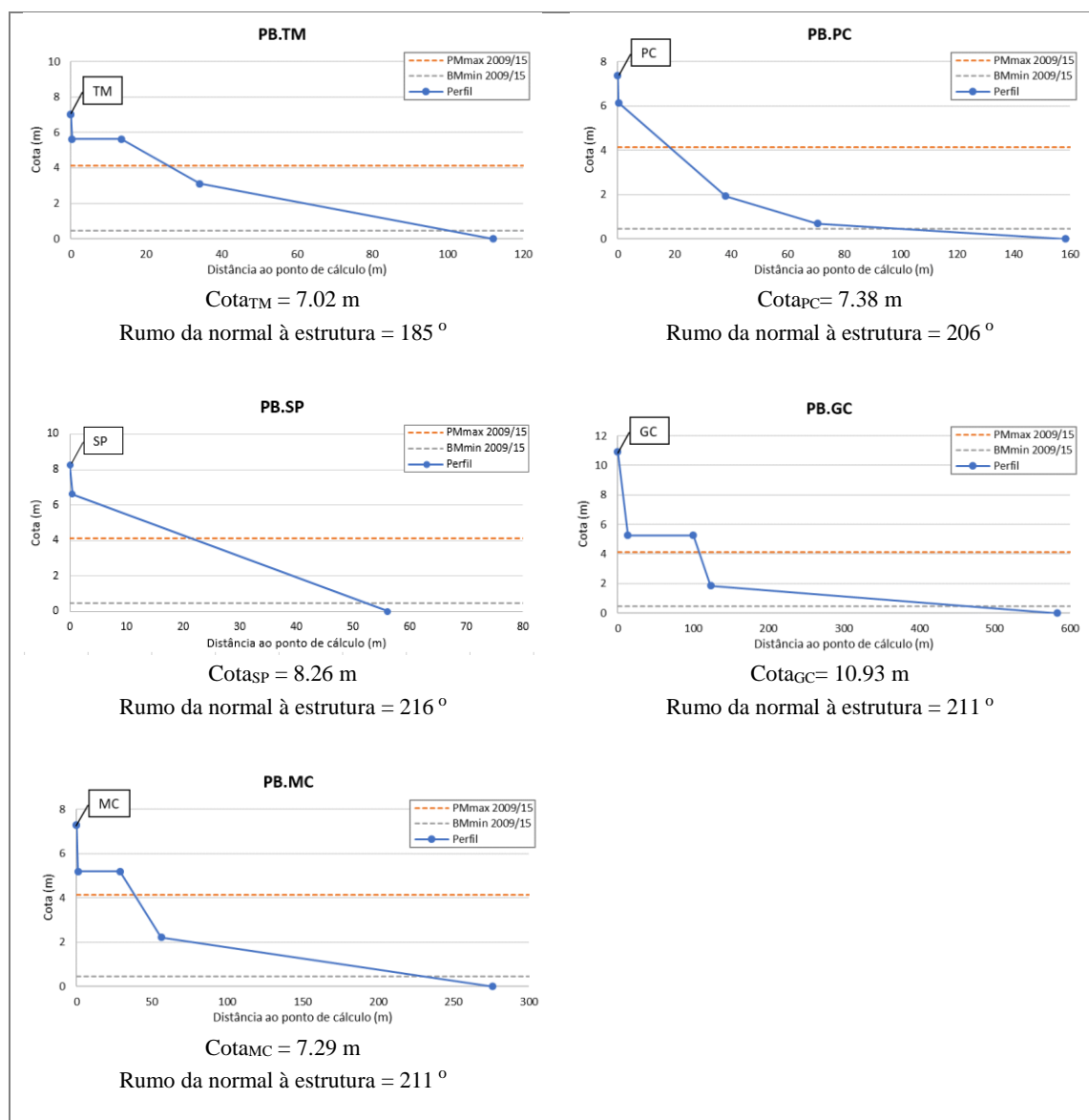


Figura 3.43. Geometria adotada para os perfis-tipo B

Consideraram-se os dados de entrada para a aplicação dos métodos Mase *et al.* (2013) e EurOtop (2016) apresentados nas Tabela 3.10 e Tabela 3.11, respetivamente.

Tabela 3.10. Input Perfis-tipo B para o modelo de Mase *et al.* (2013)

Parâmetro	PB.TM	PB.PC	PB.SP	PB.GC	PB.MC
$H_{m0}$ (m)	$H_{m0,P1}$	$H_{m0,P1}$	$H_{m0,P2}$	$H_{m0,P3}$	$H_{m0,P3}$
$T_{m-1,0}$ (s)	$T_{m-1,0,P1}$	$T_{m-1,0,P1}$	$T_{m-1,0,P2}$	$T_{m-1,0,P3}$	$T_{m-1,0,P3}$
$\beta$ (°)	$Dir_{i,P1} - 185$	$Dir_{i,P1} - 206$	$Dir_{i,P2} - 206$	$Dir_{i,P2} - 211$	$Dir_{i,P2} - 211$
$\gamma_f$ (-)	1 (Considerando que a areia se encontra totalmente molhada)				
Cota (m)	7.02	7.38	8.26	10.93	7.29
$G_c$ (m)	0	0	0	0	0
$\alpha$ (°)	6.90	4.43	6.77	8.48	6.19
$\tan(\theta)$ (-)	1:100	1:100	1:30	1:100	1:100

Tabela 3.11. Input Perfis-tipo B para o modelo do EurOtop (2016)

Parâmetro	PB.TM	PB.PC	PB.SP	PB.GC	PB.MC
$H_{m0,toe}$ (m)	$\min \{H_{m0,P4} / 0.6 \cdot h\}$	$\min \{H_{m0,P5} / 0.6 \cdot h\}$	$\min \{H_{m0,P6} / 0.6 \cdot h\}$	$\min \{H_{m0,P7} / 0.6 \cdot h\}$	$\min \{H_{m0,P7} / 0.6 \cdot h\}$
$T_{m-1,0}$ (s)	$T_{m-1,0,P4}$	$T_{m-1,0,P5}$	$T_{m-1,0,P6}$	$T_{m-1,0,P7}$	$T_{m-1,0,P7}$
$\beta$ (°)	$Dir_{i,P4} - 185$	$Dir_{i,P5} - 206$	$Dir_{i,P6} - 216$	$Dir_{i,P7} - 211$	$Dir_{i,P7} - 211$
$\gamma_f$ (-)	1 (Considerando a areia totalmente molhada)				
$R_c$ (m)	$7.02 - NM_i$	$7.38 - NM_i$	$8.26 - NM_i$	$10.93 - NM_i$	$7.29 - NM_i$
$h$ (m)	$NM_i$ (Considerando o pé da estrutura no Zero Hidrográfico)				

No caso do perfil-tipo C, considerou-se um perfil simplificado para calcular o caudal médio galgado (Figura 3.44), e analisaram-se os resultados no ponto PC.FC, sobre o passeio marítimo. Este perfil atravessa uma praia com plataforma rochosa, e admitiu-se um perfil de praia estático, representativo do perfil de inverno. Na zona onde se encontra o muro marginal, foi imposta uma pequena diferença em relação à vertical, para evitar resultados infinitos. No caso específico da aplicação do método EurOtop (2016), em contexto de praia, foi considerado que a estrutura é composta pela praia e o coroamento, admitindo-se que o “pé da estrutura” se encontra ao zero hidrográfico, de modo a que aquele elemento se apresente sempre submerso.

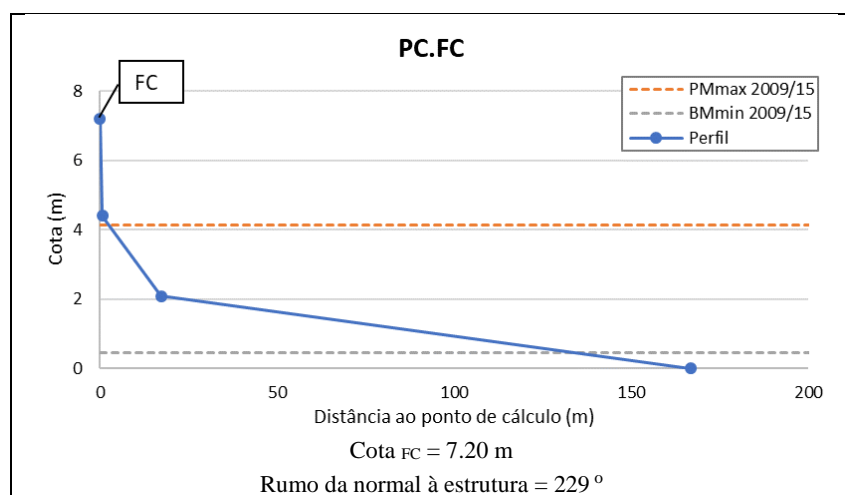


Figura 3.44. Geometria adotada para o perfil-tipo C

Tabela 3.12. Input Perfis-tipo C para o modelo de Mase et al. (2013) e EurOtop (2016)

Parâmetro	PC.FC	
	Mase et al. (2013)	EurOtop, 2016
$H_{m0}$ (m)	$H_{m0,P1}$	$\min \{H_{m0,P5} / 0.6 \cdot h\}$
$T_{m-1,0}$ (s)	$T_{m-1,0,P1}$	$T_{m-1,0,P5}$
$\beta$ (°)	$Dir_{i,P1} - 229$	$Dir_{i,P5} - 229$
$\gamma_f$ (-)	1 (Considerando a areia totalmente molhada)	
Cota (m)	7.20	----
$G_c$ (m)	0	----
$\alpha$ (°)	7.94	----
$\tan(\theta)$ (-)	1:100	----
$R_c$ (m)	----	$7.20 - NM_i$
$h$ (m)	----	$NM_i$ (Considerando o pé da estrutura no Zero Hidrográfico)

O perfil-tipo PD.FB é composto por uma arriba que limita uma plataforma de abrasão rochosa. Apesar de a arriba exibir um perfil muito irregular, com blocos sobre-salientes e concavidades, representou-se através de um perfil linear com uma inclinação aproximada de 45°. No caso específico da aplicação do método do EurOtop (2016), capítulo 5, foi admitido que o “pé da estrutura” se encontra à cota do zero hidrográfico.

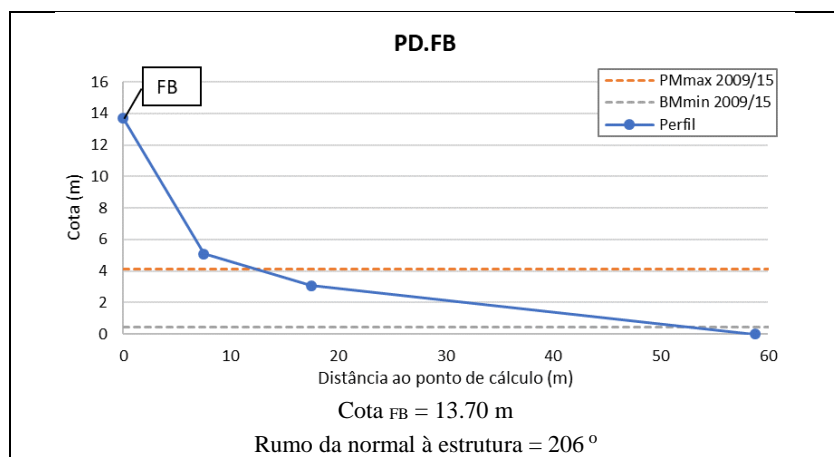


Figura 3.45. Geometria adotada para o perfil-tipo D

Tabela 3.13. Input Perfis-tipo D para o modelo de Mase et al. (2013) e EurOtop (2016)

Parâmetro	PD.FB	
	Mase et al. (2013)	EurOtop, 2016
$H_{m0}$ (m)	$H_{m0,P1}$	$\min \left\{ H_{m0,P5} \right. \\ \left. 0.6 \cdot h \right\}$
$T_{m-1,0}$ (s)	$T_{m-1,0,P1}$	$T_{m-1,0,P5}$
$\beta$ (°)	$Dir_{i,P1} - 206$	$Dir_{i,P5} - 206$
$\gamma_f$ (-)	1 (Considerando a areia totalmente molhada)	
Cota (m)	13.70 m	----
$G_c$ (m)	0 m	----
$\alpha$ (°)	4.26°	----
$\tan(\theta)$ (-)	1:100	----
$R_c$ (m)	----	$13.70 - NM_i$
$h$ (m)	----	$NM_i$ (Considerando o pé da estrutura no Zero Hidrográfico)

Os resultados obtidos nos perfis-tipo B e C, (Figura 3.46, Figura 3.47, Figura 3.48, Figura 3.49, Figura 3.50 e Figura 3.51) mostram um desfasamento na intensidade de galgamento previsto de aproximadamente uma ordem de grandeza entre métodos. Os valores de maior magnitude resultam da aplicação do método de Mase et al. (2013). No Perfil-tipo D (Figura 3.52), não é possível fazer esta comparação entre métodos (apenas um único resultado), apesar de também aqui se verificar que o único valor resulta do método do Mase et al. (2013), refletindo assim uma maior sensibilidade aos forçamentos.

Nos pontos que se encontram a cotas, notoriamente, mais elevadas, obtiveram-se valores de caudal médio inferiores, como são os casos dos pontos PB.SP, PB.PG e PD.FB com cotas que variam dos 8.26m aos 13.70 m. Nos restantes pontos (entre os 7.02 m e os 7.38 m) não se verifica uma relação direta

entre as cotas e os caudais de galgamento, sendo quase coincidentes para os pontos com cotas extremas (PB.TM e PB.PC).

O método de Mase *et al.* (2013), produz valores de pico cronologicamente coincidentes com os registos documentais, de 2011 e 2014. Pelo método EurOtop (2016), os resultados apresentam diferenças menos acentuadas, não sendo a relação com os eventos de galgamento documentados tão direta.

Comparando as projeções com os registos documentais, o temporal que provocou mais estragos foi o de 2014. Sendo mais visível pelo Mase *et al.* (2013), em que o caudal médio obtido em 2014 para os vários perfis é o mais elevado, à exceção dos resultados para o ponto PB.GC, com valores superiores em 2011.

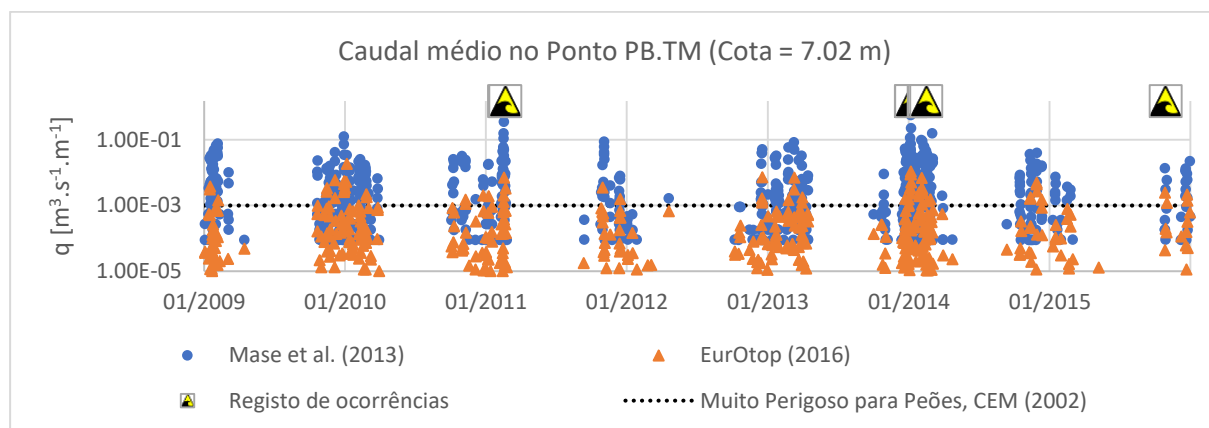


Figura 3.46. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PB.TM

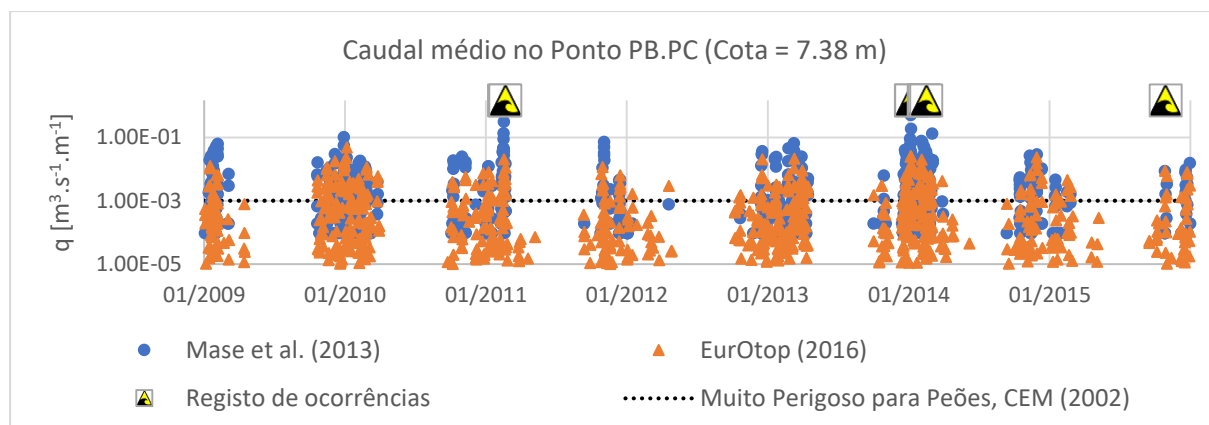


Figura 3.47. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PB.PC

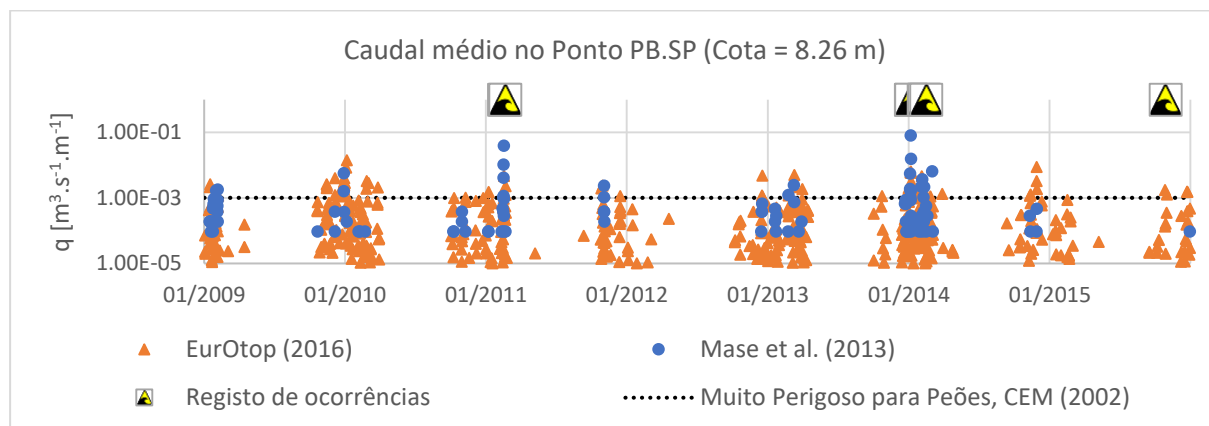


Figura 3.48. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PB.SP

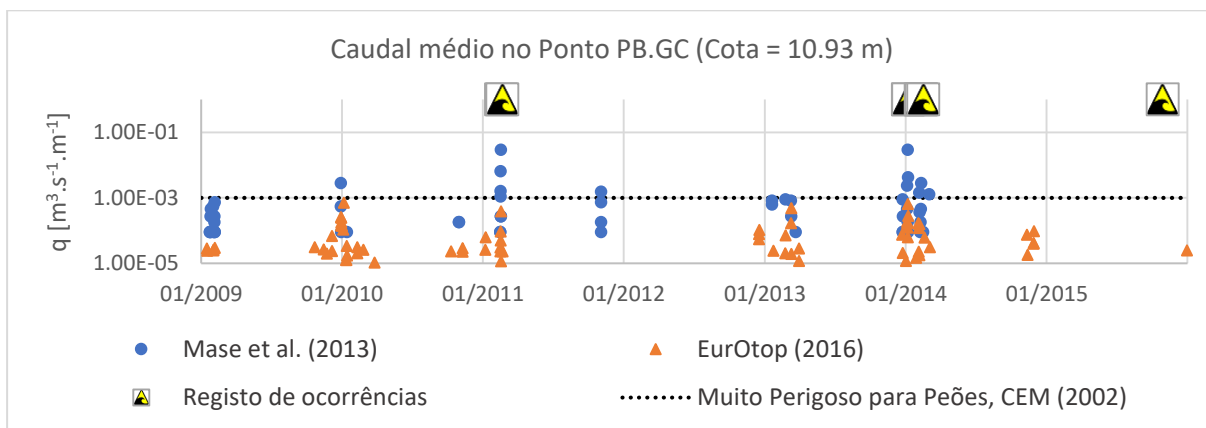


Figura 3.49. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PB.GC

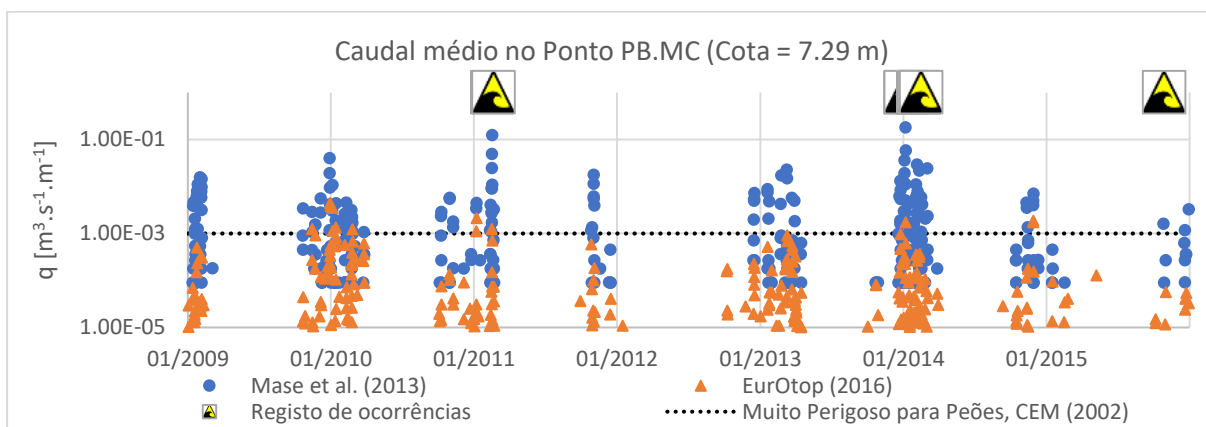


Figura 3.50. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PB.MC

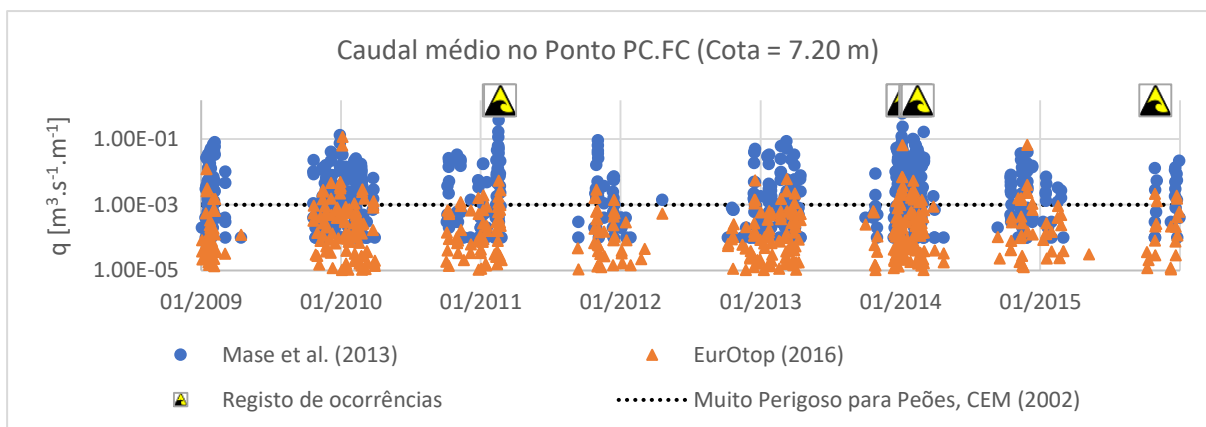


Figura 3.51. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PC.FC



Figura 3.52. Caudal médio galgado modelado, entre 2009 e 2015, no ponto PD.FB



### 3.9. VALIDAÇÃO

No dia 02 de fevereiro de 2017, enquanto decorria este estudo, a costa de Cascais foi atingida pela tempestade Dóris com agitação marítima intensa coincidente com marés vivas, dando lugar a eventos de galgamento costeiro. Estes eventos foram monitorizados através de registos fotográficos, na estofa da maré, em vários locais ao longo do troço costeiro em estudo.

Foi feita a modelação do evento e calculados os valores de caudal médio galgado para todos os perfis, entre as 12:00 h e as 21:00 h, daquele dia. Os resultados obtidos foram comparados com registos documentais e com os resultados modelados da tempestade Hércules/Christine.

A tempestade Hércules/Christine teve um grande impacto na costa portuguesa e encontra-se documentada através de um levantamento nacional dos estragos por ela causados (Pinto *et al.*, 2014). Assim considerou-se como uma tempestade de referência para possíveis comparações através da relação binomial forçamento/galgamento (causa/efeito).

#### 3.9.1. Tempestade Dóris

##### Forçamentos oceanográficos

Foram considerados os níveis do mar registados no marégrafo de Cascais (Figura 3.53) e a agitação marítima registada na boia ondógrafo da Nazaré (oceânica - M01) (Figura 3.54) no dia 02.02.2017.

Nesse dia, a agitação marítima intensificou-se a partir da tarde, atingindo 10 m de altura significativa às 20:00 h, na boia da Nazaré, com a maré a atingir 3.28 m às 18:31 h, na segunda preia-mar.

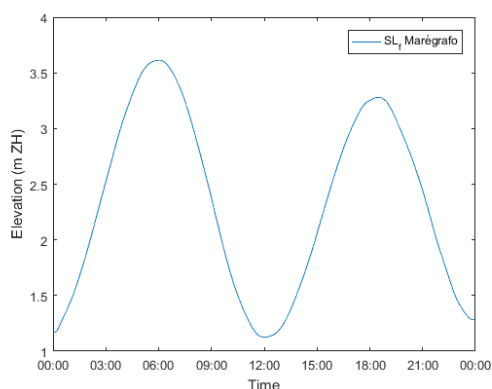


Figura 3.53. Nível do mar no dia 02.02.2017, registado no marégrafo de Cascais (DGTerritório, 2018)

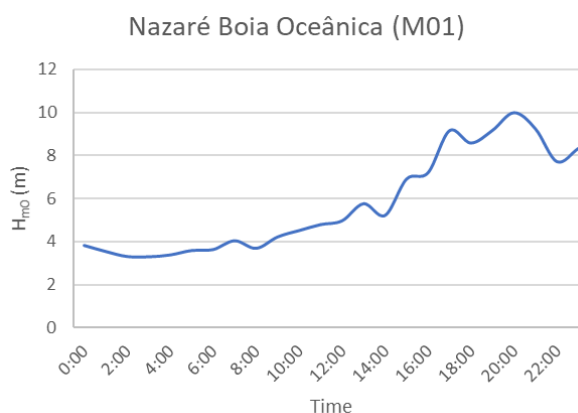


Figura 3.54. Altura significativa no dia 02.02.2017, registada na boia oceânica da Nazaré (IH, 2018)

##### Resultados

A agitação marítima, entre as 12:00 e as 21:00 h do dia 02.02.2017, foi propagada do largo para a costa de Cascais recorrendo ao modelo SWAN. Foram extraídos os dados de agitação para os sete pontos-alvo, acima indicados (Figura 3.32), e obtidos os caudais médios galgados para cada perfil em análise, usando o método EurOtop (2016), com a mesma metodologia referida no subcapítulo 3.8.

Os resultados de caudal médio galgado acompanham o efeito da maré, com valores mais elevados de caudal médio galgado na estofa de preia-mar.

Segundo estes resultados, o local com maior caudal corresponde ao passeio marítimo da praia da Poça (PB.PC), e o local com menor valor corresponde a PA.ME2, no Monte Estoril, ao nível da linha ferroviária.

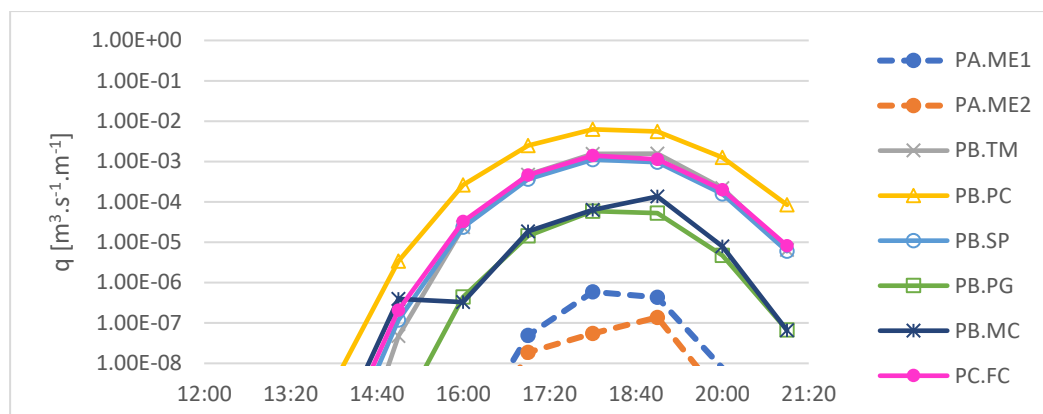


Figura 3.55. Variação dos caudais médios galgados nos vários perfis analisados entre as 12:00 h e as 21:00 h do dia 02.02.2017, devido à passagem da tempestade Dóris, pelo EurOtop (2016)

Entre as 16:55 h e as 18:25 h, do dia 02.02.2017, foram obtidos registos fotográficos em vários locais ao longo do troço costeiro em análise, identificados na Figura 3.56: (I) Monte Estoril, (II) Praia da Poça, (III) Praia da Azarujinha, (IV) Forte da Barra, (V) Praia São Pedro do Estoril e (VI) Praia da Parede, alguns dos quais com correspondência aos perfis analisados.

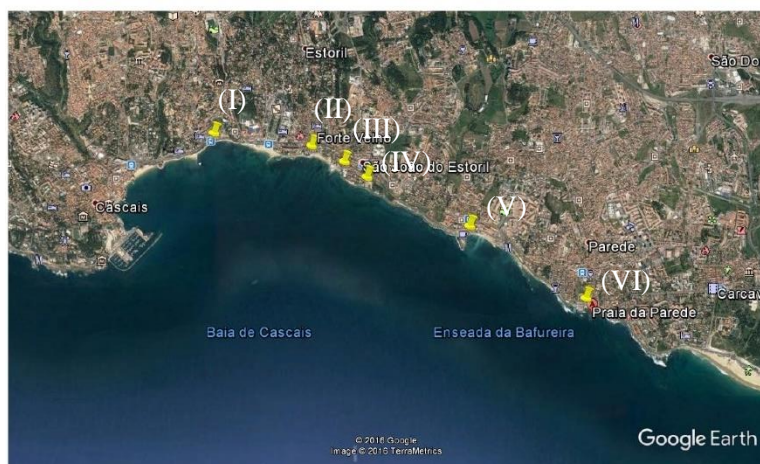


Figura 3.56. Locais monitorizados durante a tempestade Dóris, (I) Monte Estoril, (II) Praia da Poça, (III) Praia da Azarujinha, (IV) Forte da Barra, (V) Praia São Pedro do Estoril e (VI) Praia da Parede

Na região do Monte Estoril (I) existem dois perfis objeto de estudo: PA.ME1 e PA.ME2. Neste local foram recolhidas imagens às 16:55 h (Figura 3.57 e Figura 3.58). A esta hora já era visível que a lamina de água do espraio ultrapassava o bordo do passeio marítimo; em alguns locais inundou quase a totalidade da largura do passeio, mas sem atingir o muro adjacente, da linha ferroviária. Àquela hora o passeio ainda não tinha sido interditado pelas autoridades. Segundo os resultados obtidos pelo método EurOtop (2016), no perfil PA.ME1, às 17:00h, à cota e no local do passeio marítimo, seria de  $4.95 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ . Segundo CEM (2002), este valor é indicado como seguro para pedestres (Tabela 2.5). No entanto, pelas imagens, é possível ver que se poderia enquadrar na categoria “molhado mas não desconfortável”, o que poderá indicar que este valor se encontra uma ordem de grandeza abaixo do que seria expectável.

Já no caso do ponto do mesmo perfil à cota, e sobre a linha ferroviária, o seria de  $1.88 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  (seguro para pedestres), o que se enquadra com as observações de campo, como ilustrado no registo fotográfico.



Figura 3.57. Monte Estoril. Galgamento do passeio marítimo, com marcação das áreas atingidas pelas ondas no dia 02.02.2017 às 17:00 h



Figura 3.58. Monte Estoril. Galgamento do passeio marítimo no dia 02.02.2017 às 17:00 h

Na praia da Poça (II) as imagens foram recolhidas às 17:20 h; a esta hora o passeio marítimo estava a ser interditado pelas autoridades. Apesar de não se ter obtido nenhuma imagem elucidativa do galgamento, verifica-se que o piso do passeio marítimo foi atingido em toda a sua largura (Figura 3.59). Os resultados obtidos para o perfil PB.PC, indicam que o valor de caudal médio varia entre  $2.5 \times 10^{-3}$  e  $6.27 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  entre as 17:00 e as 18:00 h, respetivamente; segundo a tabela em CEM (2002) (Tabela 2.5), este valor confirma uma situação muito perigosa para peões. Como foi possível observar no local, as pessoas já não se encontravam no passeio marítimo, o que pode indicar a perceção do perigo por parte dos transeuntes.





Figura 3.59. Praia da Poça. Galgamento do passeio marítimo com marcação das áreas atingidas pelas ondas no dia 02.02.2017 às 17:20 h

Na zona adjacente, correspondente ao sopé do Forte da Cadaveira (perfil PB.FC), o galgamento foi bastante intenso às 17:30 h, atingindo cotas muito elevadas (Figura 3.60). O caudal modelado varia entre  $4.66 \times 10^{-4}$  e  $1.41 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  entre as 17:00 e as 18:00 h, respetivamente, passando de “perigoso” para “muito perigoso” para pedestres (CEM, 2002).



Figura 3.60. Forte da Cadaveira. Galgamento do passeio marítimo no dia 02.02.2017 às 17:30 h

No Forte da Barra, visitado pelas 18:00 h, não foram visíveis sinais de galgamento no topo da arriba (Figura 3.61), validando assim os resultados obtidos para o perfil PD.FB (caudal inferior a  $1 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) àquela hora.

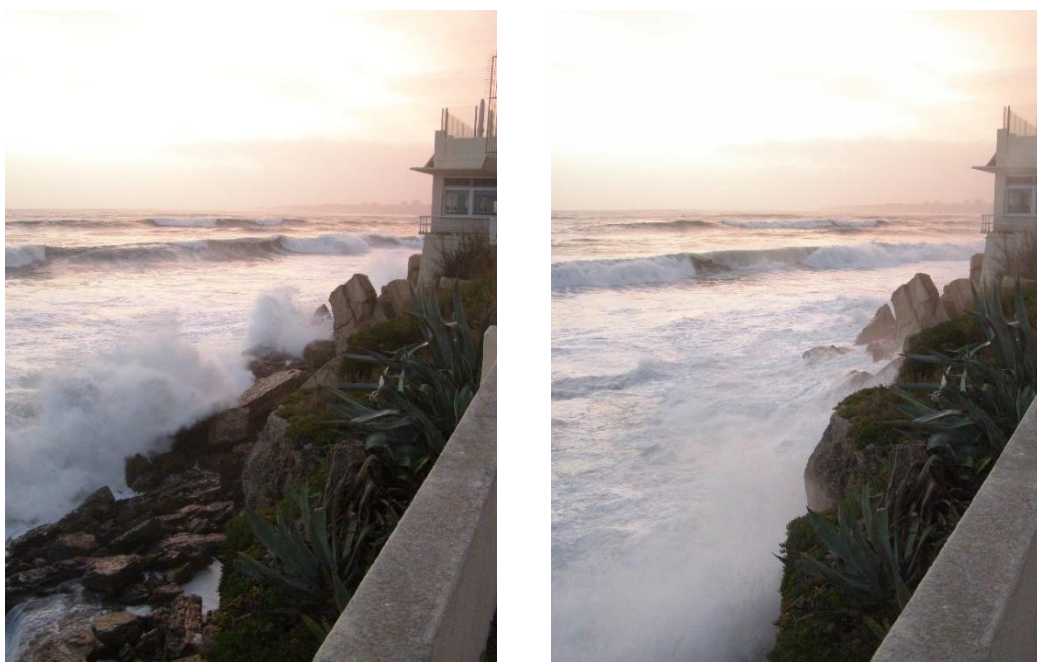


Figura 3.61. Forte da Barra no dia 02.02.2017 às 18:00 h

Já na praia de São Pedro do Estoril as imagens foram recolhidas às 18:10 h (Figura 3.62), não foram observados vestígios galgamento no sector representado pelo perfil PB.SP, que atravessa a zona mais larga da praia, sector onde se encontravam pessoas no passeio marítimo, o resultado da modelação no mesmo perfil, às 18:00 h, foi de  $1.11 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , correspondendo-lhe uma classificação de “muito perigoso” para as pessoas, o que não corresponde à observação de terreno.



Figura 3.62. Praia de São Pedro do Estoril no dia 02.02.2017 às 18:10 h

### 3.9.2. Tempestade Dóris vs Tempestade Hércules/Christine

Foram comparados os resultados máximos de  $q$  modelados para as tempestades Dóris (2 de fevereiro de 2017) e Hércules/Christine (de 3 a 7 de janeiro de 2014), em cada perfil. Foram escolhidas estas tempestades porque tiveram intensidades muito diferentes e porque são duas ocorrências para as quais existe alguma informação disponível sobre os impactos na faixa costeira, como referido acima.

Da comparação entre os valores máximos de  $q$  obtidos para cada perfil por tempestade (Figura 3.63) verifica-se que os resultados da tempestade Hércules/Christine são superiores, como seria de esperar. No entanto, as diferenças de caudal são pouco acentuadas, cerca de uma ordem de grandeza, o que contrasta com a diferença da magnitude dos efeitos provocados por cada uma delas (Tabela 3.1, Figura 3.1). Apenas no sopé do Forte da Cadaveira (PC.FC) e junto à linha ferroviária (PA.ME2) se verificam diferenças mais acentuadas.

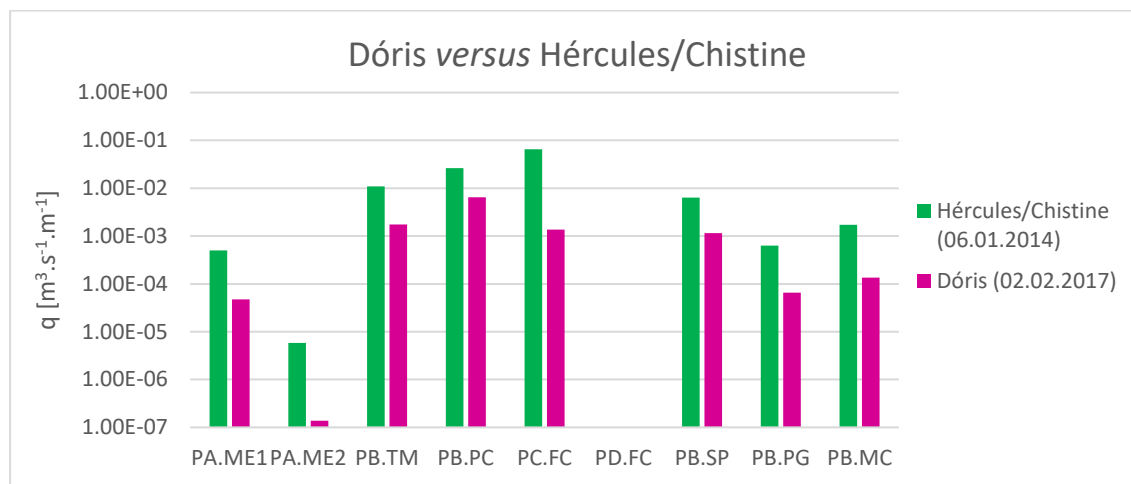


Figura 3.63. Distribuição longitudinal (de oeste para leste) dos caudais médios galgados nas tempestades Dóris e Hércules/Christine, por perfil.

Em relação à análise da Tempestade Dóris, em quase todos os perfis analisados a modelação acompanhou as observações, à exceção do PB.SP. Segundo os resultados, na praia da Poça obtiveram-se os valores mais elevados. No entanto, pelas imagens e as observações *in loco*, a zona do Forte da Cadaveira foi onde se verificaram ondas de galgamento maiores.

Da comparação entre tempestades, da tempestade Hércules/Christine resultaram valores de galgamento maiores que os resultantes da tempestade Dóris, mas as diferenças são pequenas. Este resultado não corresponde à diferença de danos causados que foram significativamente maiores no primeiro caso. Estas observações poderão decorrer das simplificações geométricas assumidas nos perfis e, no caso das praias, do facto de se assumir que o perfil se mantém inalterado, o que não corresponde à realidade, uma vez que as praias de areia sofrem alterações do perfil em resposta ao forçamento. Em termos das parametrizações adotadas, é de referir que, nas praias assumiu-se que o talude se encontra totalmente molhado, com  $\gamma_f=1$ , não havendo lugar à redução do espraio e galgamento devido à rugosidade e permeabilidade do talude. Tal não acontece em todas as situações modeladas, principalmente em condição de SLW muito abaixo da cota de coroamento do perfil.

Em todos os perfis-tipo, foi analisado o caudal médio galgado, através do qual se fez a análise qualitativa do impacto destas tempestades, e não os volumes máximos atingidos em cada evento. No entanto, são o volume de máximo, e os volumes perto do máximo, que causam os maiores danos, pondo em causa a segurança de pessoas e bens (EurOtop, 2016). Segundo EurOtop (2016), o volume máximo pode ser 100 a 1000 vezes maior que o caudal médio galgado (menor para  $q$  reduzido, aumentando com o aumento de  $q$ ). Assim, podem obter-se valores médios semelhantes, mas com valores de pico muito diferentes, o que poderá explicar as diferenças pouco acentuadas de caudal médio galgado entre as tempestades face aos danos observados.

## 4. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

---

Nesta dissertação abordou-se o problema do galgamento costeiro no troço litoral entre Cascais e Carcavelos, na perspetiva de abranger todo o troço costeiro recorrendo a perfis-tipo e a metodologias consagradas na literatura, para quantificar a perigosidade associada a este fenómeno natural.

O litoral em estudo apresenta um desenvolvimento em planta não linear, sendo atingido pela agitação marítima de forma distinta ao longo do troço. Verifica-se um gradiente da intensidade da agitação costeira decrescente para leste, sendo o *subtroço* I (entre a Piscina Oceânica e a Azarujinha) que é mais fustigado, por duas razões: a propagação da agitação marítima é quase normal à linha de costa e altura de onda é mais elevada.

No que concerne à frente costeira, esta apresenta perfis com configurações e conteúdos muito diversos, tendo sido caracterizada através de quatro perfis-tipo. A cada perfil-tipo foram aplicados dois métodos de cálculo, comparados entre si. Para tal, recorreu-se à aplicação do modelo empírico de Mase *et al.* (2013), à ferramenta neuronal NN\_OVERTOPPING 2 e às formulações empíricas apresentadas no manual EurOtop (2016). Procurou-se validar os resultados modelados através de informação documental e observações de terreno na sequência das tempestades Dóris e Hércules/Christine.

De um modo geral, os resultados modelados apresentam picos de caudal médio galgado concordantes com eventos documentados, embora não haja coincidência total entre observações e resultados da modelação que, prevê, no entanto, intensidades de galgamento superiores às observadas. De entre os modelos empíricos testados, a modelação proposta por Mase *et al.* (2013) produziu resultados mais consistentes com as observações, pese embora a sobrestima da intensidade modelada. Verificou-se que as formulações empíricas apresentadas em EurOtop (2016) devolvem resultados menos sobrestimados, contudo, a não é tão notória a concordância entre os valores de pico modelados e os eventos documentados. No que toca à ferramenta neuronal NN\_Overtopping 2, esta devolve resultados de pico em 2014 e 2011, porém, com pouca diferença face aos resultados obtidos nos restantes invernos da série estudada, não diferenciando claramente o impacto do potencial de galgamento destes dois eventos extremos.

Estudaram-se dois eventos de galgamentos com danos muito distintos, as tempestades Dóris, de 2017, e Hércules/Christine, de 2014, recorrendo ao modelo empírico do EurOtop (2016). Os resultados modelados produzem diferenças de magnitude dos caudais médios galgados entre os eventos, ainda que pequenas face à diferença dos impactos observados em cada evento.

É plausível que o grau de concordância entre resultados modelados e observados melhorasse aumentando a resolução temporal dos dados de agitação marítima (e.g. frequência horária de amostragem), de modo a melhorar a representação do estado de mar em todo o ciclo de maré. Porém, não é claro se as discrepâncias resultam da parametrização dos modelos e da modelação, dos parâmetros de análise ou da imprecisão e escassez dos instrumentos de validação.

Para que estes modelos possam ser utilizados enquanto ferramenta de previsão de eventos de galgamento, seria necessário proceder-se à calibração dos parâmetros empíricos, através de validação extensa e de natureza quantitativa, de modo a melhorar o respetivo desempenho face à realidade. A validação requer a monitorização detalhada do litoral e o reporte e documentação dos eventos de galgamento deve ser sistemático conter informação objetiva (e.g. data e hora, local, cota atingida e descrição dos efeitos no litoral) que permita comparabilidade. Atualmente, não está implementado um sistema deste tipo para estes eventos.



A experiência adquirida concorda com a literatura, na conclusão de que nenhuma das ferramentas empíricas testadas tem aplicabilidade global; de facto todas elas necessitam de parametrização caso a caso. A generalização de uma metodologia para avaliação do potencial de galgamento a um leque de contextos geomorfológico mais abrangente, beneficiaria da aplicação de modelos numéricos de propagação da onda rebentada até ao limite do alcance do espraio, como, por exemplo, o modelo numérico SWASH (Simulating WAVes till SHore) de utilização livre, desenvolvido pela TU Delft (Delft University of Technology) (SWASH, 2018).

A experiência acumulada no âmbito deste trabalho permitiu à signatária familiarizar-se com as abordagens quantitativas ao galgamento costeiro e com os métodos de modelação deste fenómeno, assim como com as ferramentas de modelação e análise dos parâmetros de forçamento do sistema costeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Altomare, C., Suzuki, T., Chen, X., Verwaest, T., & Kortenhaus, A. (2016). Wave overtopping of sea dikes with very shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 116, 236–257. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2016.07.002>
- Alveirinho Dias, J. M., & Taborda, R. P. M. (1988). Evolução recente do Nível Médio do Mar: em Portugal. *Anais do Instituto Hidrográfico*, 9, 83–97. Obtido de [http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/papers/RN/88\\_AnaisIH.pdf](http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/papers/RN/88_AnaisIH.pdf)
- Antunes, C. (2013). *Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo. Caracterização do regime de marés. Entregável 1.1.3.a.* Obtido de [https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Políticas/Agua/Ordenamento/SistemasMonitorizacaoLitoral/E\\_1.1.3.a\\_Regime\\_mares.pdf](https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Políticas/Agua/Ordenamento/SistemasMonitorizacaoLitoral/E_1.1.3.a_Regime_mares.pdf)
- Antunes, C. (2014). *Eventos extremos e a variação do nível do mar*. Lisboa: 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Junho de 2014. Instituto Hidrográfico. Obtido de [http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/artigos/Resumos\\_Alargado\\_3JEH2014\\_C.ANTUNES-c1.pdf](http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/artigos/Resumos_Alargado_3JEH2014_C.ANTUNES-c1.pdf)
- Antunes, C. (2016). *Subida do Nível Médio do Mar em Cascais, revisão da taxa actual*. Lisboa: 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Junho de 2016. Instituto Hidrográfico. Obtido de [http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/artigos/C.Antunes\\_Resumo\\_Alargado\\_4JEH2016\\_pt.pdf](http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/artigos/C.Antunes_Resumo_Alargado_4JEH2016_pt.pdf)
- Antunes, C. (2018). FCUL - Previsão de Marés. Obtido a 31 de janeiro de 2018, de [http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro\\_mares.html](http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html)
- Bairrão, M. R. M. (2014). *Galgamento de estruturas portuárias protegidas por um quebra-mar submerso*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Estruturas. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa. Obtido de <https://run.unl.pt/handle/10362/12465>
- Battjes, J. A. (1974). *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves*. Delft University of Technology. Obtido de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:e126e043-a858-4e58-b4c7-8a7bc5be1a44>
- Bertin, X., Prouteau, E., & Letetrel, C. (2013). A significant increase in wave height in the North Atlantic Ocean over the 20th century. *Global and Planetary Change*, 106, 77–83. <https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2013.03.009>
- Carmo, J. S. A. (2016). *Processos físicos e modelos computacionais em engenharia costeira*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra. <https://doi.org/10.14195/978-989-26-1153-2>
- CEM. (2002). *CEM: Coastal Engineering Manual, EM 1110-2-1100*. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers (USACE).
- CLC. (2012). CORINE Land Cover. Obtido a 31 de maio de 2018, de <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>
- Coeveld, E. M., Van Gent, M. R. A., & Pozueta, B. (2005). Neural network manual for NN\_Overtopping program. *CLASH WP8*. Obtido de <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3AAbf81b442-f3ed-4a6f-9b62-0c1dbb1e4c6c>

- Cunha, L. (2013). Vulnerabilidade: a face menos visível do estudo dos riscos naturais. Em *Homenagem ao professor doutor Fernando Rebelo*. Coimbra: Universidade de Coimbra. Obtido de [https://www.uc.pt/fluc/depgeotur/publicacoes/Livros/livro\\_homenagem\\_FRebelo/153\\_165](https://www.uc.pt/fluc/depgeotur/publicacoes/Livros/livro_homenagem_FRebelo/153_165)
- Cunha, L., & Dimuccio, L. (2002). Considerações sobre riscos naturais num espaço de transição: exercícios cartográficos numa área a Sul de Coimbra. *Territorium: Revista Portuguesa de riscos, prevenção e segurança*, (9), 37–51. [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_9\\_3](https://doi.org/10.14195/1647-7723_9_3)
- DGTerritório. (2009). Cobertura Regular de Ortofotografia Aérea da Costa de Portugal Continental de 10 cm do ano de 2008 - WMS - INSPIRE. Direção Geral do Território. Obtido de <http://id.igeo.pt/sdg/af4d46d4-f85d-40a2-92a1-99fd5271e88c>
- DGTerritório. (2011). Modelo Digital do Terreno das Zonas Costeiras de Portugal Continental com resolução de 1 m (400 m em terra) - LiDAR (Continente). Direção Geral do Território. Obtido de <http://snig.dgterritorio.pt/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7BEC94A6C0-0971-4725-B647-2FEC93594D88%7D>
- DGTerritório. (2018). Rede Maregráfica da Direção Geral do Território. Obtido a 16 de setembro de 2018, de <ftp://ftp.dgterritorio.pt/Maregrafos/>
- EurOtop. (2007). *Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual*. Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., Van der Meer, J.W. Obtido de [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com)
- EurOtop. (2016). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. Van der Meer, J. W. Allsop, N. W. H. Bruce, T. De Rouck, J. Kortenhaus, A. Pullen, T. Schüttrumpf, H. Troch, P. Zanuttigh, Barbara. GBR. Obtido de [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com)
- FEMA. (2005). *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners [January 2005] D.4.5 Wave Setup, Runup, and Overtopping*. Obtido de <https://www.fema.gov/media-library-data/d5628f66b0b3189e0891e0c1a580a013/Wave+Setup+Runup+and+Overtopping+-+Chapter-Section+Number+-+D.4.5.pdf>
- Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., & Neves, P. (2013). Programa Calcula\_Runup\_Galgamento\_Mase.f. Obtido de <http://repositorio.lnec.pt:8080/jspui/handle/123456789/1005678>
- Gonçalves, P. A. M. (2015). *Dinâmica de arribas no concelho de Cascais. Determinação das faixas de salvaguarda*. Relatório de Estágio. Universidade de Lisboa. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Obtido de <http://repositorio.ul.pt/handle/10451/20499>
- Hedges, T. S., & Reis, M. T. (1998). Random wave overtopping of simple seawalls: a new regression model. *Water, Maritime and Energy Journal*, 130(1), 1–10. Obtido de [https://www.researchgate.net/profile/Maria\\_Teresa\\_Reis/publication/296734712\\_Random\\_wave\\_overtopping\\_of\\_simple\\_sea\\_walls\\_A\\_new\\_regression\\_model/links/57455e1a08ae9f741b408bc6.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Maria_Teresa_Reis/publication/296734712_Random_wave_overtopping_of_simple_sea_walls_A_new_regression_model/links/57455e1a08ae9f741b408bc6.pdf)
- Henriques, M. J., Martinho, M., Neves, C., & Sota, E. (2014). *Cascais 650 Anos de História*. Cascais. Cascais: Câmara Municipal de Cascais. ISBN: 978-972-637-258-5. Obtido de [https://www.cascais.pt/sites/default/files/anexos/gerais/new/2014\\_arquivos\\_650anos\\_vila\\_cascais\\_livro1\\_0.pdf](https://www.cascais.pt/sites/default/files/anexos/gerais/new/2014_arquivos_650anos_vila_cascais_livro1_0.pdf)
- IH. (2012). Modelo batimétrico de Cascais (Resolução espacial de 100 m). Instituto Hidrográfico. Obtido de [http://horus.hidrografico.pt/content/dados/ModeloBatimetrico\\_Cascais.rar](http://horus.hidrografico.pt/content/dados/ModeloBatimetrico_Cascais.rar)

- IH. (2013). Modelo batimétrico do Rio Lis ao Cabo Espichel. Instituto Hidrográfico. Obtido de [http://horus.hidrografico.pt/content/dados/ModeloBatimetrico\\_RioLis\\_CaboEspichel.rar](http://horus.hidrografico.pt/content/dados/ModeloBatimetrico_RioLis_CaboEspichel.rar)
- IH. (2018). MONICAN - MONItorização do CANhão da Nazaré. Instituto Hidrográfico. Obtido a 26 de setembro de 2018, de <http://monican.hidrografico.pt/default/monican.php>
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pachauri, Rajendra K Allen, Myles R Barros, Vicente R Broome, John Cramer, Wolfgang Christ, Renate Church, John A Clarke, Leon Dahe, Qin Dasgupta, Purnamita Others. IPCC.
- Komar, P. D. (1976). *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice-Hall. ISBN: 978-013-072-595-0.
- Kovács, Z. L. (2006). *Redes Neurais Artificiais* (4ª Ed.). São Paulo, Brasil: Livraria da Física. ISBN: 85-88325-14-4
- Mase, H., & Kirby, J. T. (1993). Hybrid Frequency-Domain KdV Equation for Random Wave Transformation. Em *Coastal Engineering 1992* (pp. 474–487). New York, NY: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780872629332.035>
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T. S., & Reis, M. T. (2013). Wave Runup and Overtopping at Seawalls Built on Land and in Very Shallow Water. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 139(5), 346–357. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000199](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000199)
- PDM Cascais. (2014). Plano Diretor Municipal Cascais [Revisão]. Relatório dos Estudos de Caracterização. Cascais: Câmara Municipal de Cascais. Obtido de [www.cascais.pt](http://www.cascais.pt)
- Pinto, C., Rodrigues, A., Costa, C., & Lima, J. (2014). *Registo das ocorrências no litoral Temporal de 3 a 7 de janeiro de 2014*. Agência Portuguesa do Ambiente. Obtido de [http://www.apambiente.pt/\\_zdata/DESTAQUES/2014/RelatorioNacional\\_Ocorr\\_Jan\\_2014\\_V5.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2014/RelatorioNacional_Ocorr_Jan_2014_V5.pdf)
- Playocean©. (2018). Praias Oceânicas de Portugal Continental. Obtido a 31 de maio de 2018, de <https://www.playocean.net/>
- PORDATA. (2017). PORDATA - Estatísticas, gráficos e indicadores de Municípios, Portugal e Europa. Obtido 7 de Junho de 2018, de <https://www.pordata.pt/>
- Ramalho, M., Rey, J., Zbyszewski, G., Alves, C. M., Almeida, F. M., Costa, C., & Kullberg, M. C. (1981). *Notícia Explicativa e Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50 000, da Folha 34-C (Cascais)*. Lisboa.
- Reis, M. T., & Neves, M. da G. (2010). Estudo do Galgamento de Estruturas Marítimas utilizando um Modelo Numérico baseado na Teoria da Onda em Condições de Água pouco Profunda. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 10(4), 397–417. <https://doi.org/10.5894/rgci227>
- RGCI. (2007). Glossário de Gestão Costeira Integrada. Obtido a 12 de abril de 2017, de <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/index.html>
- Ronald, A. R. T. (2011). Wave | water | Britannica.com. Obtido a 18 de abril de 2017, de <https://www.britannica.com/science/wave-water>
- Schwartz, M. (2006). *Encyclopedia of coastal science*. The Netherlands: Springer Science & Business Media.

- Sequeira, E., & Ramalho, M. (2010). *Roteiros do Património de Cascais - Património Natural e Geológico*. (C. M. de Cascais, Ed.). Cascais: Câmara Municipal de Cascais. Obtido de [https://biblioteca.cascais.pt/bibliotecadigital/DG15/DG15\\_item1/DG15\\_PDF/DG15\\_PDF\\_24-C-R0150/DG15\\_ObraCompleta\\_t24-C-R0150.pdf](https://biblioteca.cascais.pt/bibliotecadigital/DG15/DG15_item1/DG15_PDF/DG15_PDF_24-C-R0150/DG15_ObraCompleta_t24-C-R0150.pdf)
- SWAN. (2018). *SWAN User Manual - SWAN Cycle III version 41.20A*. Delft: Delft University of Technology. Obtido de <http://swanmodel.sourceforge.net/>
- SWASH. (2018). *SWASH User Manual - Version 5.01*. Delft University of Technology. Obtido de <http://swash.sourceforge.net/>
- Taborda, R., Andrade, C., Marques, F., Freitas, M. C., Rodrigues, R., Antunes, C., & Pólvora, C. (2010). *Plano Estratégico de Cascais Face às Alterações Climáticas: Sector Zonas Costeiras*. Cascais. Obtido de <https://www.cascais.pt>
- Teixeira, N. J. de S. (2014). *Estudo do limite de espraçamento das ondas*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro. Obtido de <https://ria.ua.pt/handle/10773/13991>
- Tolman, H. (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*. Technical Note 276. NOAA/NWS/N, Vol. 166
- van der Meer, J. W., & Janssen. (1995). Wave Run-Up and Wave Overtopping at Dikes. Em K. and Demirbilek (Ed.), *Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures* (pp. 1–27). American Society of Civil Engineers.
- Vieira, R., Antunes, C. e Taborda, R. (2012). *Caracterização da sobrelevação meteorológica em Cascais nos últimos 50 anos*. Lisboa: 2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Instituto Hidrográfico.
- Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58, 992–1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>

**ANEXOS**

---

## **ANEXO A – COMPILAÇÃO DAS Ocorrências**

---



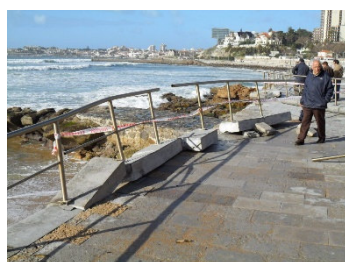
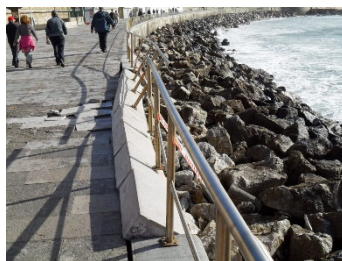
Ocorrência nº 01

Data e Hora: 16/02/2011

Locais: **Praia do Tamariz**

Descrição: **Galgamento do Paredão com estragos dos equipamentos**

Fonte(s): **SMPC Cascais – Imagens do dia 17.02.2011**



Ocorrência nº 02

Data e Hora: 20/02/2011 (Madrugada)

Locais: Praia do Tamariz, Praia das Moitas e Praia de Carcavelos

Descrição: Estragos no Paredão Linha de Cascais e quebras de vidros de restaurantes

Fonte(s): Agência Lusa



MAU TEMPO

## Mar provoca estragos ao longo do paredão na Linha de Cascais

LUSA 20/02/2011 - 08:40



Ao longo do paredão, há danos no pavimento e nas estruturas metálicas junto às rochas  
BRUNO RASCÃO (ARQUIVO)

O estado do mar agravou hoje de madrugada os estragos provocados nos últimos dias pela forte agitação marítima, na Linha de Cascais, com danos no paredão e num restaurante, disse à Lusa fonte da Polícia Marítima.

“Esta noite tivemos uma maré muito grande e destruiu ainda mais”, afirmou a fonte da Polícia Marítima de Cascais, referindo-se aos danos causados pelas ondas na zona do Estoril, nomeadamente no Tamariz.

“Toda a zona do paredão foi muito fustigada”, acrescentou, relatando também danos frente ao hotel “Mirage”, em Cascais.

Carcavelos também não escapou à forte ondulação, que partiu vidros do restaurante “Pastorinha”, indicou a mesma fonte.

Ao longo do paredão, há danos no pavimento e nas estruturas metálicas junto às rochas, onde o mar chega a arrastar pedras de grande peso e vedação em dias de mau tempo.

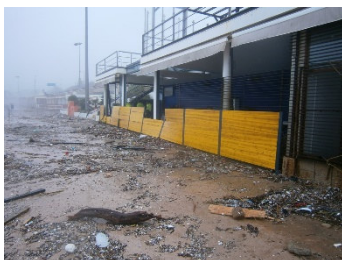
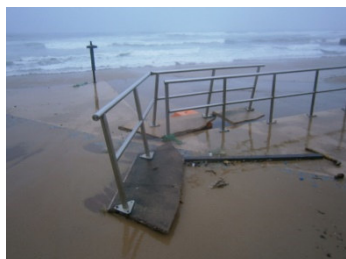
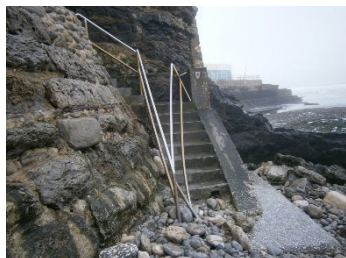
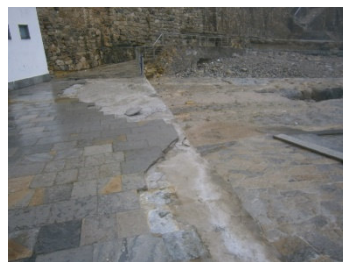
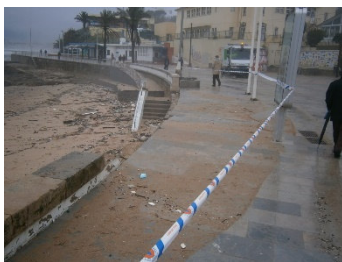
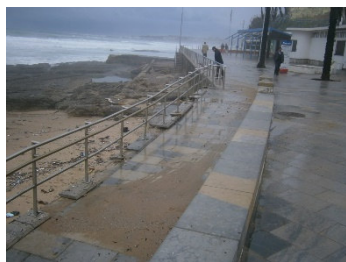
Ocorrências nº 03 e 04

Data e Hora: 06/01/2014 19:50  
07/01/2014 08:35

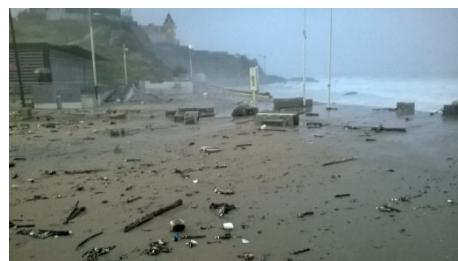
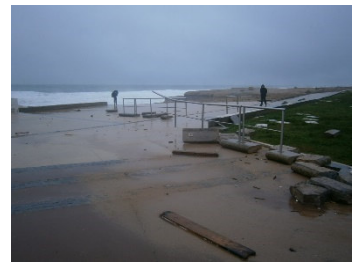
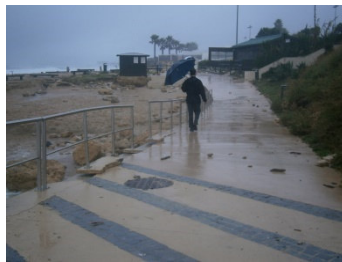
Locais: Praia do Tamar Praia da Duquesa, Praia das Moitas, Paredão – Monte Estoril, Praia do Tamariz, Paredão entre a praia do Tamariz e a praia da Poça, Praia da Poça, Praia da Azarujinha, Praia das Avencas, Praia de Carcavelos

Descrição: Estragos no passeio marítimo, em estabelecimentos de restauração, nos apoios de praia e em equipamentos e infraestruturas

Fonte(s): SMPC Cascais







Ocorrências nº 05

Data e Hora: **08/02/2014 16:00**

Locais: **Praia do Tamariz**

Descrição: **Agitação Marítima**

Fonte(s): **SMPC Cascais**

(Não existe mais nenhum tipo de informação)

Ocorrências nº 06

Data e Hora: **09/02/2014 23:55**

Locais: **Praia da Parede**

Descrição: **Agitação Marítima**

Fonte(s): **SMPC Cascais**

(Não existe mais nenhum tipo de informação)

Ocorrências nº 07

Data e Hora: **15/02/2014 15:15**

Locais: **Avenida Marginal na zona da Parede**

Descrição: **Agitação Marítima**

Fonte(s): **SMPC Cascais**

(Não existe mais nenhum tipo de informação)

Ocorrência nº 08

Data e Hora: 03/03/2014 16:00

Locais: Praia do Tamariz, Praia da Poça e Praia da Azarujinha

Descrição: Fecho do passeio marítimo entre o Tamariz e a Azarujinha devido à agitação marítima.

Fonte(s): SMPC e Correia da Manhã

04/10/2017

Ondas condicionam acessos à Praia Grande e paredão de Cascais - Cm ao Minuto - Correio da Manhã



IMPRESSO DO SITE DO JORNAL CORREIO DA MANHÃ, EM WWW.CMJORNAL.PT



## Ondas condicionam acessos à Praia Grande e paredão de Cascais

Forte agitação marítima cortou o trânsito em Almoçageme. Mar volta a atingir a marginal da Foz do Douro, no Porto, e o paredão da Costa da Caparica.

03.03.14

A estrada de acesso à Praia Grande, no concelho de Sintra, e parte do paredão de Cascais foram na tarde desta segunda-feira vedadas à circulação, devido à forte agitação marítima, confirmaram as autoridades locais e marítimas.

A estrada para a Praia Grande foi cortada ao trânsito cerca das 15h30, no cruzamento para Almoçageme, informou o presidente da Junta de Freguesia de Colares, Rui Santos. A medida foi levada a cabo pela GNR e pela Polícia Municipal de Sintra.

As ondas, de acordo com o autarca, já tinham galgado para a estrada antes das 16h30, mas sem provocar danos como em situações anteriores.

"Isto está mau", desabafou Rui Santos, esperando que o facto de já ter passado a preia-mar contribua para minimizar os estragos.

"Já vieram dizer para a gente fechar, porque não sabem quando é que a estrada pode reabrir", adiantou à Lusa uma fonte do restaurante Angra, situado em frente ao areal. "O mar já saltou para a estrada", confirmou um dos responsáveis do estabelecimento.

A Câmara de Sintra informou que a Proteção Civil começou por condicionar o trânsito no acesso junto às piscinas da Praia Grande a partir "das 14h30 e o perímetro foi alargado às 16h00" para o cruzamento perto do parque de campismo.

Segundo a autarquia, "o acesso à praia ficará cortado até estarem reunidas condições de segurança para pessoas e bens".

"O mar está com força e já saltou para o estacionamento, mas o restaurante não está em risco", garantiu, por seu lado, Jorge Pimenta, concessionário da Praia da Adraga. O comerciante esclareceu que, por precaução, colocou as proteções dos vidros do restaurante e as autoridades vedaram a zona mais próxima do areal.

"Afastámos as pessoas do paredão como medida de prevenção", revelou o comandante da Capitania do Porto de Cascais, Dário Moreira. A forte agitação do mar e a preia-mar, por volta das 16:00, levou a autoridade marítima a condicionar a utilização do paredão entre as praias do Tamariz, Poça e Azarujinha.

<http://www.cmjornal.pt/cm-ao-minuto/detalhe/ondas-condicionam-acessos-a-praia-grande-e-paredao-de-cascais>

1/2

04/10/2017

Ondas condicionam acessos à Praia Grande e paredão de Cascais - Cm ao Minuto - Correio da Manhã

A partir das previsões do Instituto Português do Mar e da Atmosfera para forte agitação marítima, a Autoridade Nacional de Proteção Civil decretou alerta vermelho para sete distritos do país, entre os quais Lisboa, entre as 12h00 e as 23h59 desta segunda-feira.

"Prevê-se que as condições de agitação marítima comecem a melhorar nas próximas horas, mas vamos estar atentos à situação durante a próxima preia-mar", admitiu Dário Moreira, apesar de não esperar mais danos com a subida da maré até às 04h00 de terça-feira.

A Polícia Marítima foi chamada a tomar conta de um incidente que envolveu uma mulher na Praia da Poça.

O comandante da Capitania do Porto de Cascais ainda aguardava esclarecimentos sobre as circunstâncias em que a mulher foi resgatada de dentro de água, uma vez que os seus pertences não foram arrastados para o mar.

A mulher foi assistida por uma unidade do Instituto Nacional de Emergência Médica e transportada "em estado grave" para o Hospital de Cascais.

#### **Mar volta a atingir marginal na Foz do Douro, no Porto**

A agitação marítima voltou esta tarde a atingir a Foz do Douro, no Porto, tendo chegado à marginal, sem que tenha havido feridos, mas causando alguns danos materiais, disseram à Lusa várias fontes.

De acordo com fonte da Polícia Marítima do Douro, há a relatar "alguns danos materiais não avultados até ao momento", confirmando situações semelhantes noutros pontos costeiros.

O vereador da Proteção Civil da Câmara Municipal do Porto, Manuel Sampaio Pimentel, disse que o mar se aproximou da rua do Passeio Alegre, à semelhança do que aconteceu no começo de janeiro, mas sublinhou que apenas foram arrastados detritos, uma vez que a zona já se encontrava vedada.

De acordo com Sampaio Pimentel, a situação só se deverá voltar a agravar na próxima preia-mar, prevista pelo Instituto Hidrográfico para as 04h45, sem que sejam esperadas ondas de igual dimensão.

A Câmara do Porto anunciou no domingo que a agitação marítima prevista iria obrigar a interditar o trânsito na marginal e a vedar o acesso aos molhes e bares e restaurantes de praia, em princípio até terça-feira.

#### **Autoridade marítima atenta à ondulação de quatro metros prevista para a Caparica**

A forte ondulação na Costa da Caparica (Almada) já galgou hoje o paredão da frente urbana, mas as autoridades admitem que a situação pode "complicar-se" de madrugada, segundo o adjunto do capitão do Porto de Lisboa, Cruz Gomes.

"A situação poderá complicar-se durante a próxima madrugada com a preia-mar prevista para as 04h22, dado que se prevê uma ondulação de quatro metros", disse Cruz Gomes, admitindo que possam surgir alguns problemas provocados pela agitação marítima a partir das 01h00.

Durante a tarde desta segunda-feira o mar já começou a galgar o paredão da frente urbana da Costa da Caparica, mas, segundo o responsável da Capitania do Porto de Lisboa, sem causar problemas de maior.

"O mar já começou a galgar o paredão mas, até agora, sem grande violência e sem provocar danos significativos", disse Cruz Gomes, adiantando que a Polícia Marítima já interditou o acesso dos peões ao paredão e já alertou os concessionários dos apoios de praia para não correrem risco durante a próxima madrugada.

De acordo com uma estimativa da Associação dos Apoios de Praia da Frente Urbana da Costa da Caparica (AAPFUCC), a forte ondulação nas praias da Caparica desde janeiro já provocou prejuízos estimados de 250.000 euros em diversos restaurantes e apoios de praia.



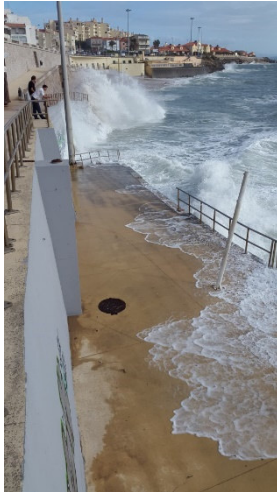
Ocorrência nº 09

Data e Hora: **28/10/2015 15:00**

Locais: **Praia do Tamariz, Praia da Parede e Praia de Carcavelos**

Descrição: **Galgamentos com alguns danos nas infraestruturas**

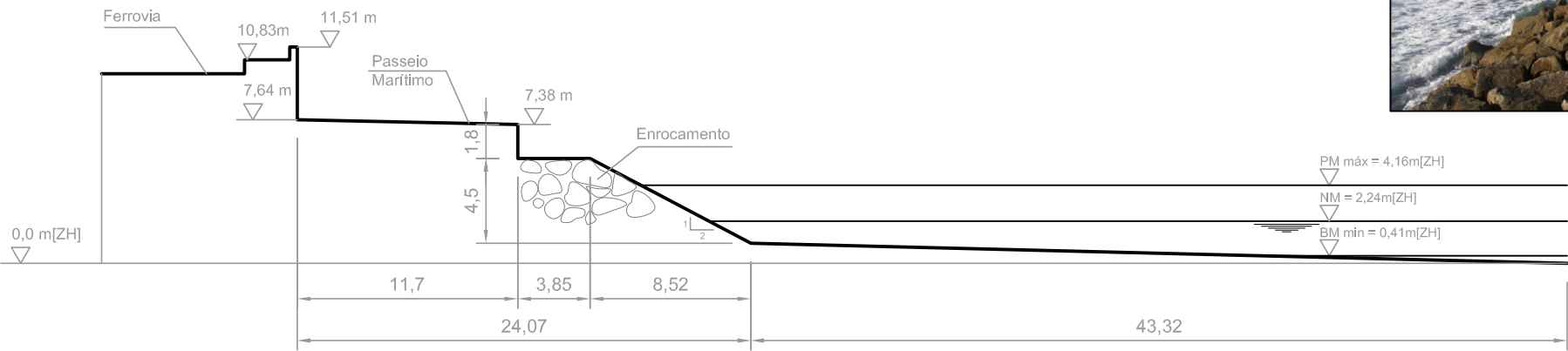
Fonte(s): **SMPC**



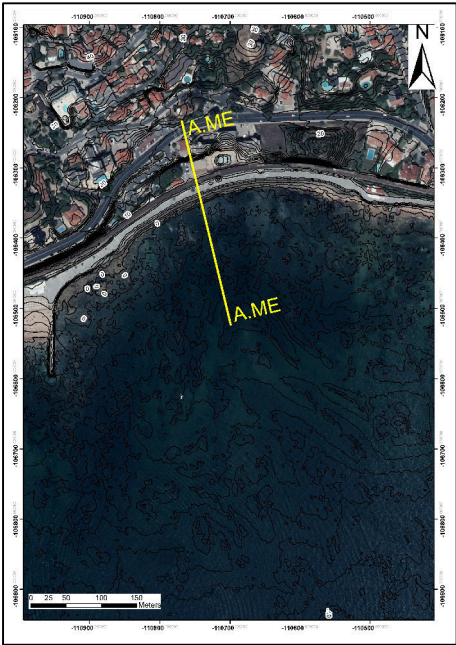
## **ANEXO B – PEÇAS DESENHADAS**

---

# Perfil A.ME - Monte do Estoril

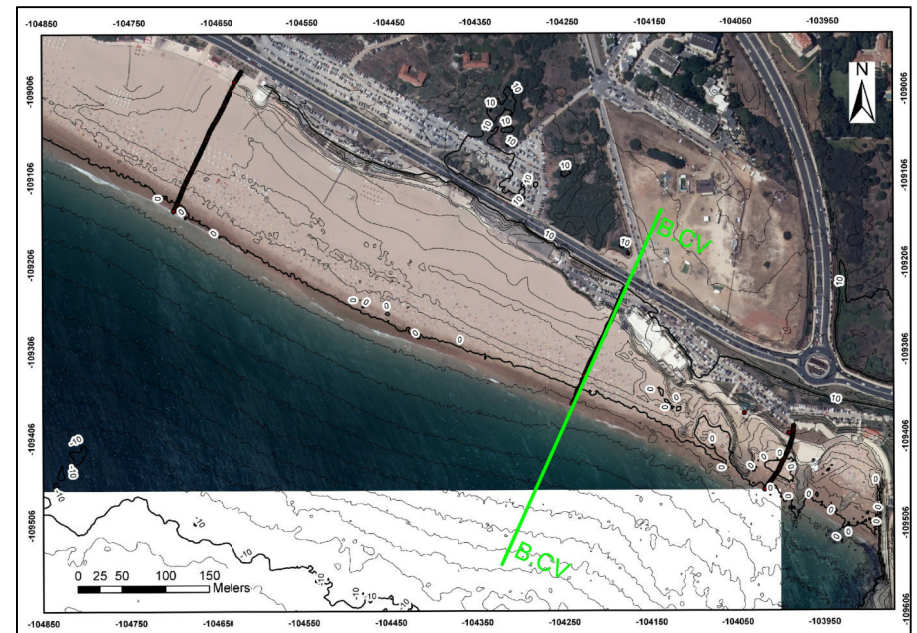
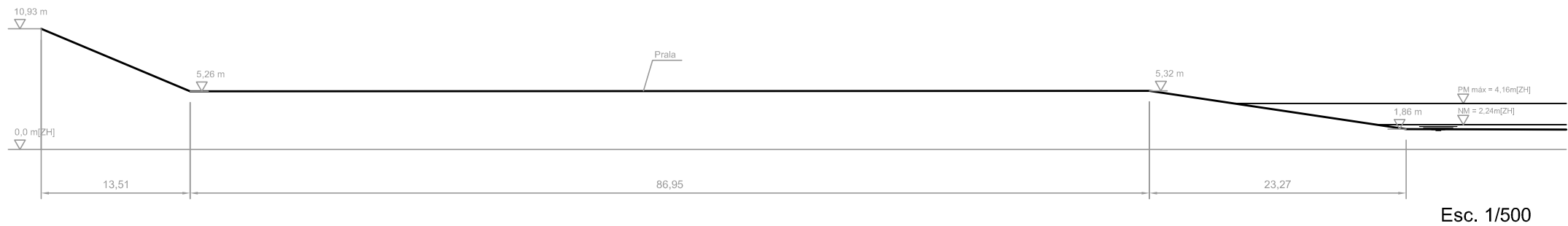


Esc. 1/350



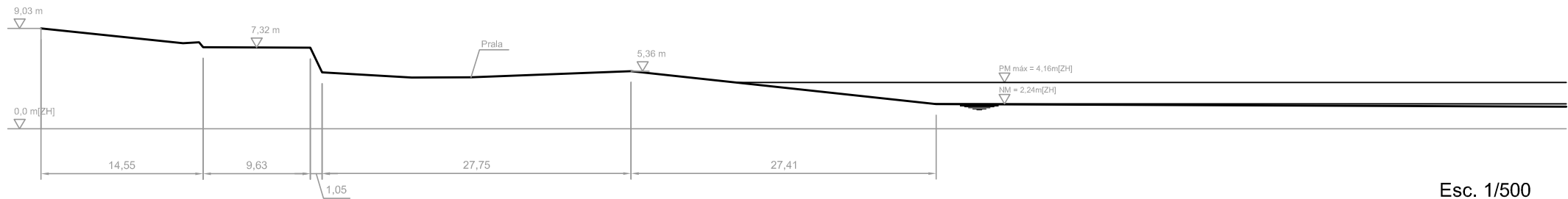


## Perfil B.GC - Praia dos Gémeos (Carcavelos)

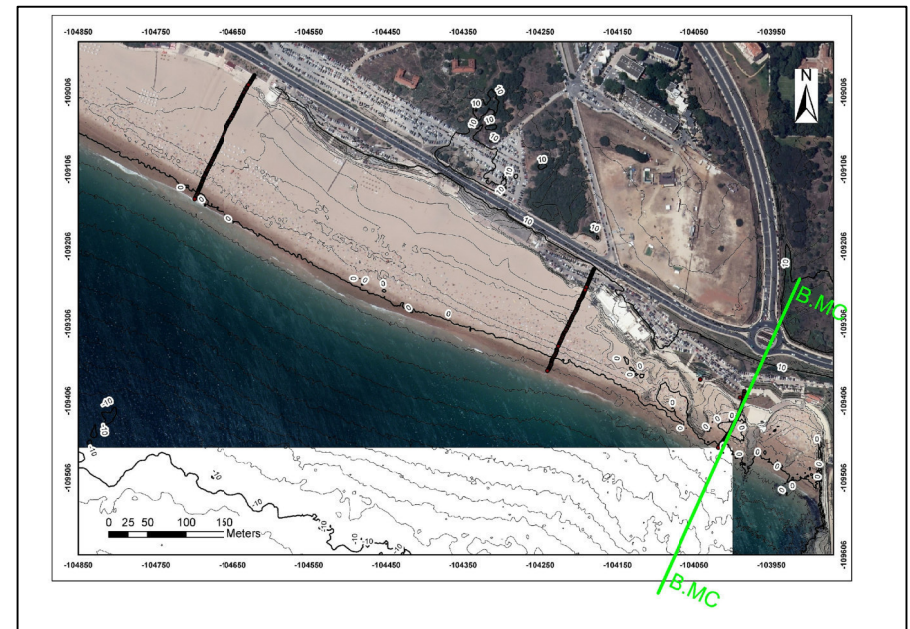




## Perfil B.MC - Praia do Moinho (Carcavelos)

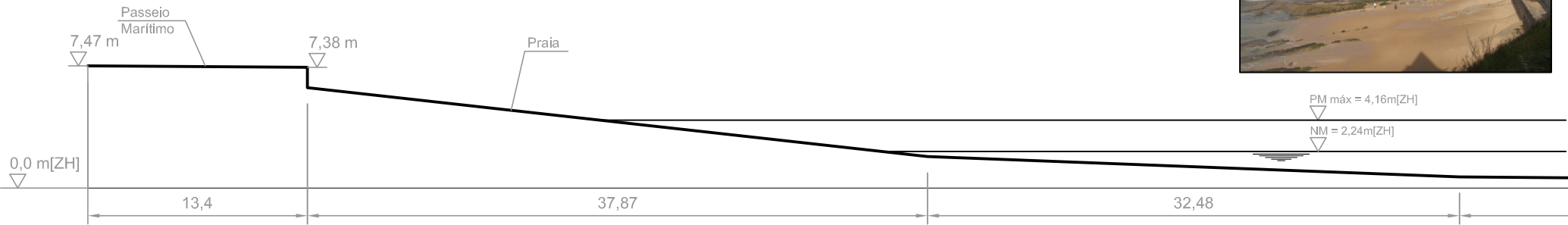


Esc. 1/500

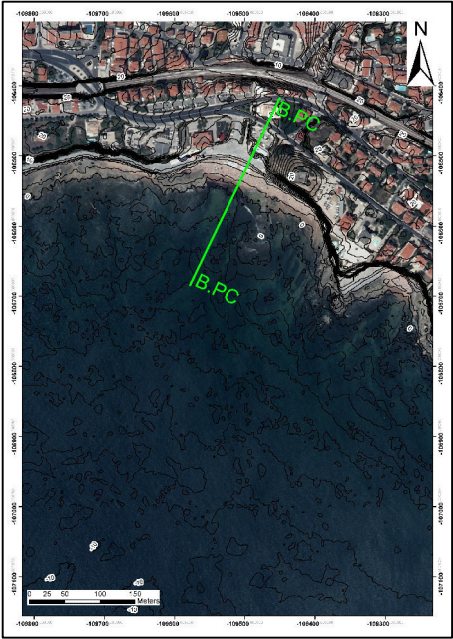




Perfil B.PC - Praia da Poça

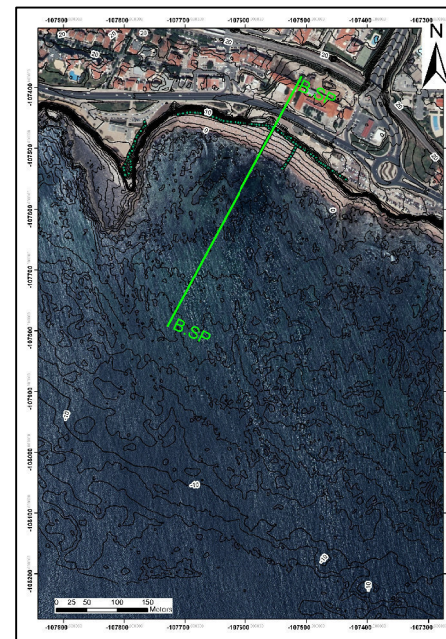
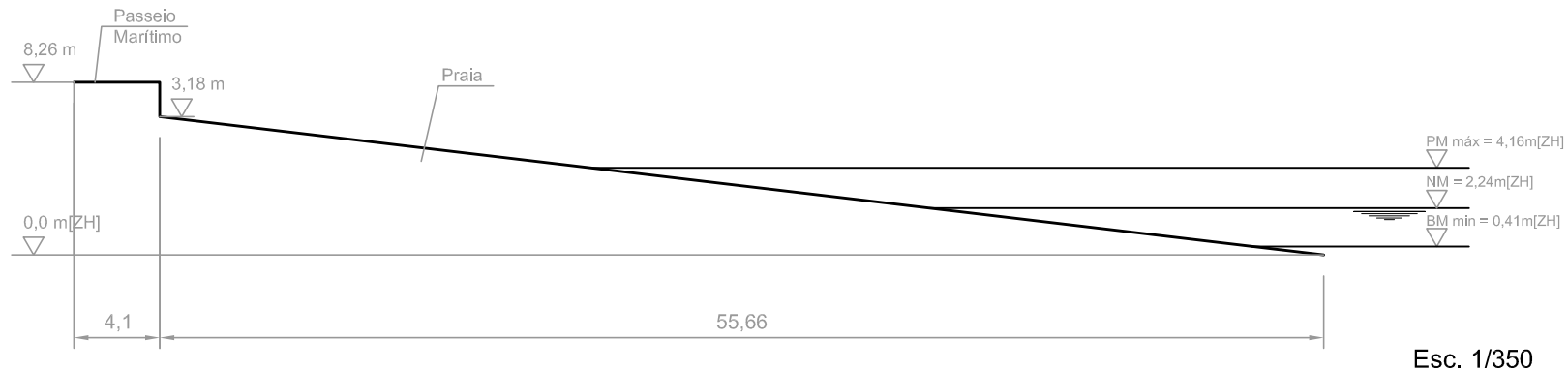


Esc. 1/350



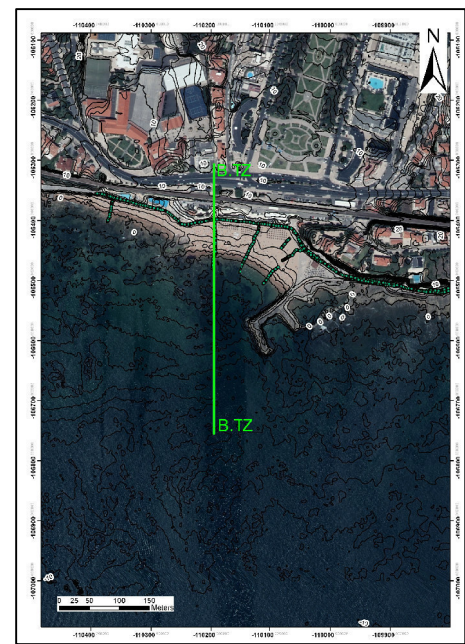
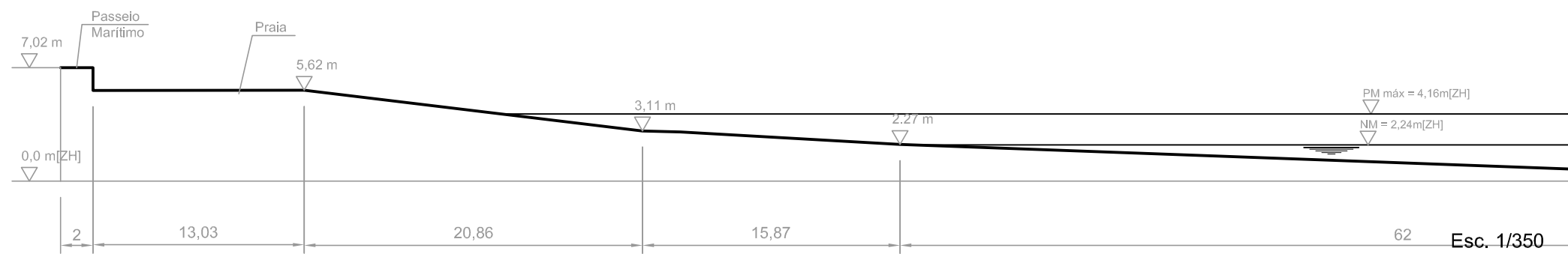


## Perfil B.SP - São Pedro do Estoril



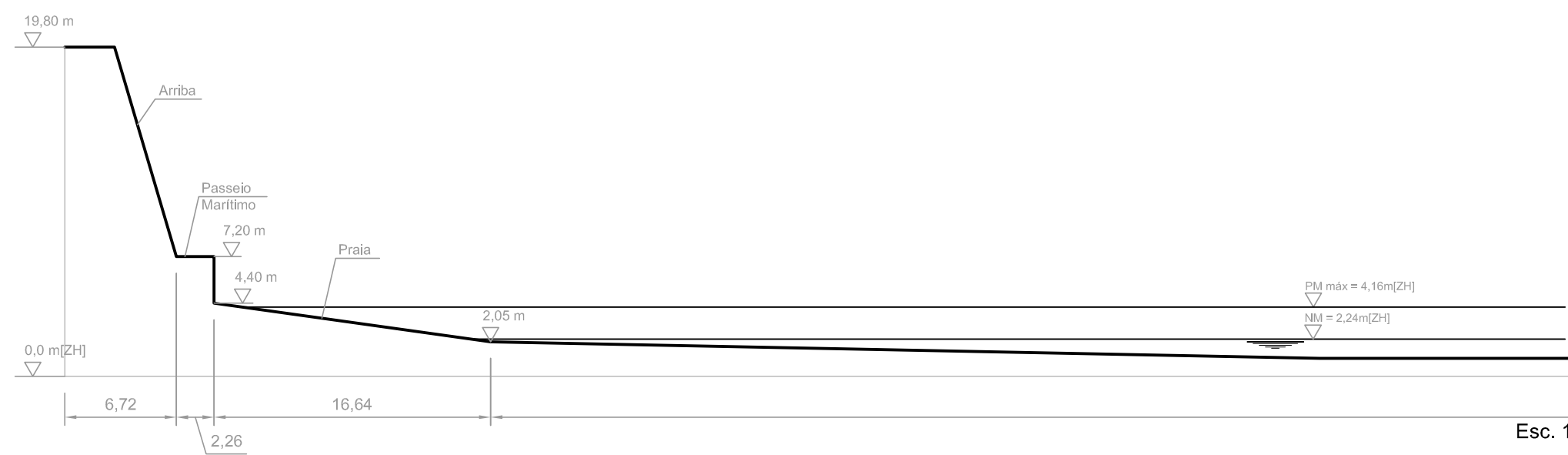


# Perfil B.TZ - Praia do Tamariz

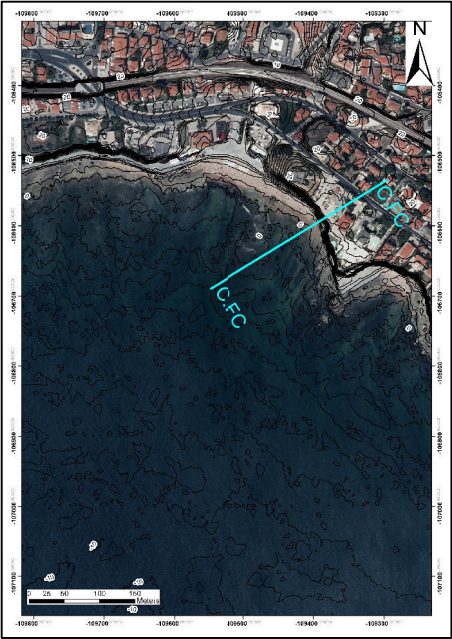




# Perfil C.FC - Forte da Cadaveira (Praia da Poça )

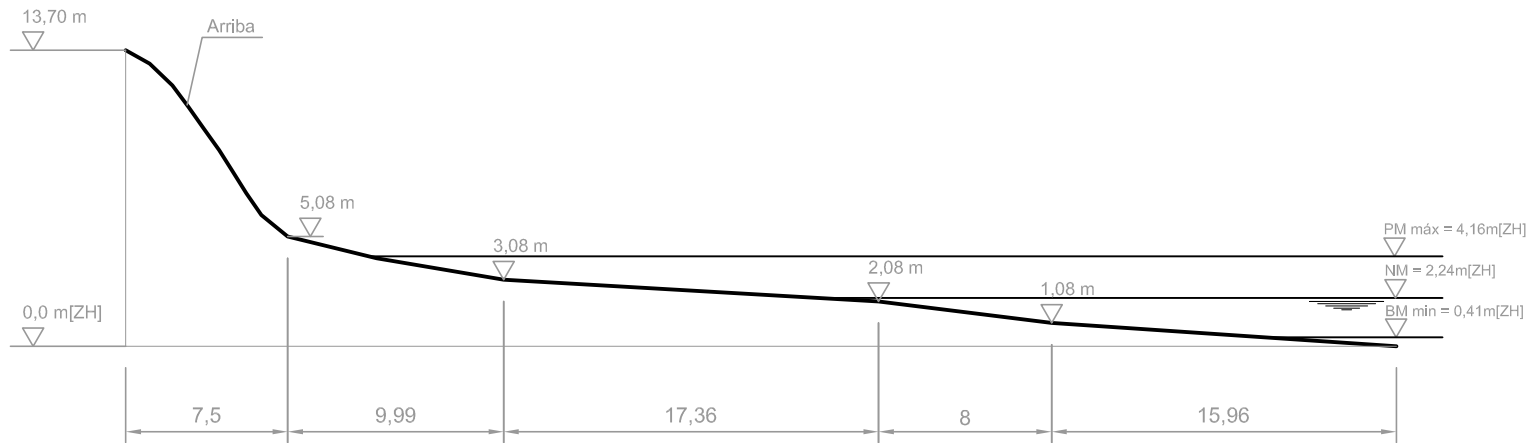


Esc. 1/350

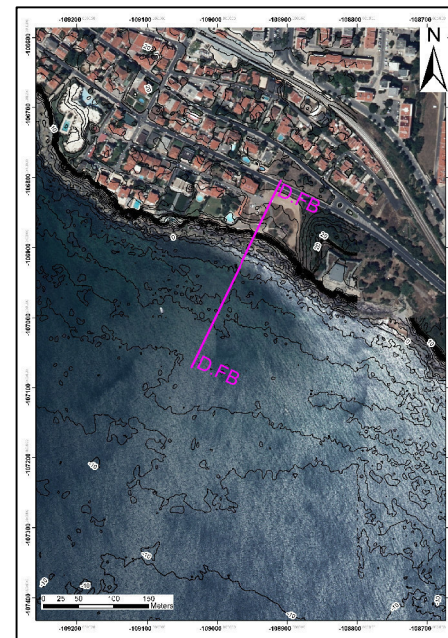




## Perfil D.FB - Forte Santo António da Barra



Esc. 1/350



## **ANEXO C – MARÉS: VALORES MÉDIOS E EXTREMOS**

---

## Marés: Valores Médios e Extremos

Tabela AXX- 1. Tabelas de alturas médias e extremos da maré de Cascais, referidos ao ZH

Ano	PM max	PM AV	PM med	PM AM	PM min	NMM	BM max	BM AM	BM med	BM AV	BM min
2017 <sup>1</sup>	3.99	3.68	3.33	2.97	2.63	2.27	1.91	1.57	1.20	0.87	0.54
2016 <sup>1</sup>	4.05	3.66	3.33	2.96	2.70	2.26	1.85	1.56	1.19	0.87	0.46
2015 <sup>1</sup>	4.11	3.68	3.33	2.95	2.69	2.25	1.79	1.55	1.18	0.83	0.45
2014 <sup>1</sup>	4.09	3.68	3.33	2.95	2.61	2.25	1.86	1.55	1.18	0.83	0.51
2013 <sup>1</sup>	4.01	3.65	3.31	2.94	2.59	2.25	1.89	1.55	1.19	0.85	0.55
2012 <sup>1</sup>	4.00	3.63	3.30	2.92	2.61	2.25	1.88	1.57	1.19	0.87	0.50
2011 <sup>1</sup>	4.14	3.64	3.30	2.92	2.61	2.25	1.83	1.58	1.20	0.87	0.49
2010 <sup>2</sup>	4.14	3.63	3.28	2.91	2.63	2.25	1.91	1.58	1.22	0.87	0.45
2009 <sup>2</sup>	4.07	3.60	3.26	2.90	2.52	2.25	1.98	1.59	1.23	0.89	0.49
2008 <sup>2</sup>	3.96	3.59	3.26	2.88	2.47	2.24	1.98	1.59	1.23	0.90	0.64
2007 <sup>2</sup>	4.00	3.58	3.25	2.87	2.58	2.23	1.86	1.59	1.21	0.87	0.50
2006 <sup>2</sup>	4.16	3.58	3.24	2.86	2.58	2.23	1.94	1.60	1.23	0.89	0.43
2005 <sup>2</sup>	4.04	3.57	3.23	2.85	2.48	2.23	1.95	1.60	1.22	0.90	0.54
2004 <sup>2</sup>	3.91	3.58	3.24	2.86	2.48	2.23	1.98	1.58	1.22	0.88	0.58
2003 <sup>2</sup>	3.98	3.60	3.25	2.86	2.54	2.23	1.93	1.58	1.20	0.86	0.47
2002 <sup>2</sup>	4.08	3.60	3.26	2.89	2.60	2.22	1.81	1.56	1.19	0.85	0.41
2001 <sup>2</sup>	4.08	3.59	3.26	2.88	2.52	2.22	1.89	1.56	1.18	0.86	0.47
Mínimo	3.91	3.57	3.23	2.85	<b>2.47</b>	2.22	1.79	1.55	1.18	0.83	<b>0.41</b>
Médio	4.05	<b>3.62</b>	<b>3.28</b>	<b>2.90</b>	2.58	<b>2.24</b>	1.90	<b>1.57</b>	<b>1.20</b>	<b>0.87</b>	0.50
Máximo	<b>4.16</b>	3.68	3.33	2.97	2.70	2.27	<b>1.98</b>	1.60	1.23	0.90	0.64

Fontes:

1 - [http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro\\_mares.html](http://webpages.fc.ul.pt/~cmantunes/hidrografia/hidro_mares.html)

2 -

[https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Políticas/Água/Ordenamento/SistemasMonitorizacaoLitoral/E\\_1.1.3.a\\_Regime\\_mares.pdf](https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/Geodocs/geoportaldocs/Políticas/Água/Ordenamento/SistemasMonitorizacaoLitoral/E_1.1.3.a_Regime_mares.pdf)

PMmax	Máxima Preia-mar
PMAV	Média das Preias-mar em Águas Vivas
PMmed	Média de todas as Preias-mar
PMAM	Média das Preias-mar em Águas Mortas
PMmin	Mínima Preia-mar
NMM	Nível Médio do Mar
BMmax	Máxima Baixa-mar
BMAM	Média das Baixa-mar em Águas Mortas
BMmed	Média de todas as Baixa-mar
BMAV	Média das Baixa-mar em Águas Vivas
BMmin	Mínima Baixa-mar do ano